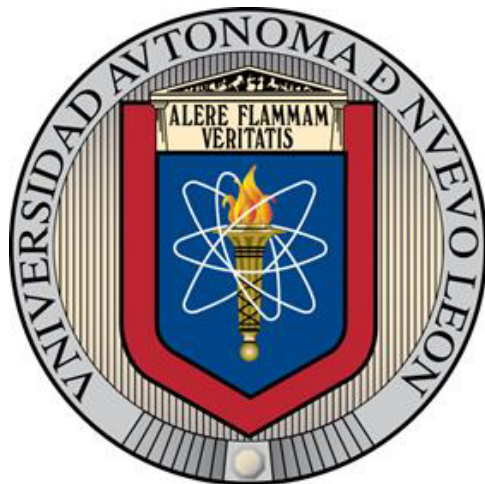


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**TESIS**

**“DISTRIBUCIÓN DE AYUDA HUMANITARIA CON  
ACCESIBILIDAD COMO MEDIDA DE DESEMPEÑO”**

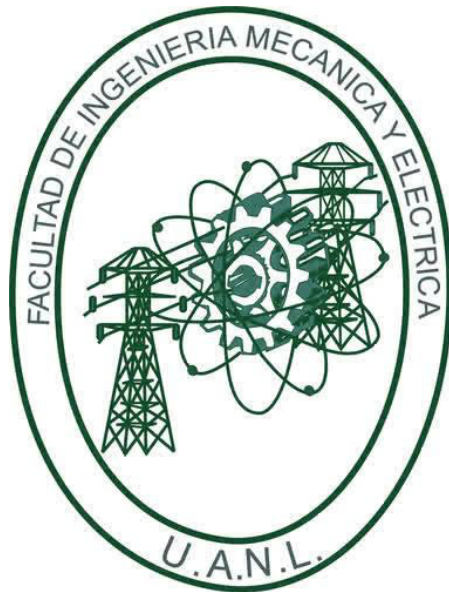
**POR**

**MELANIE SOLÍS MATA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

**ABRIL, 2017**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS**

**“DISTRIBUCIÓN DE AYUDA HUMANITARIA CON  
ACCESIBILIDAD COMO MEDIDA DE DESEMPEÑO”**

**POR**

**MELANIE SOLÍS MATA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

**ABRIL, 2017**

# Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Distribución de ayuda humanitaria con accesibilidad como medida de desempeño», realizada por el alumno Melanée Solís Mata, con número de matrícula 1395261, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis



Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

Asesor



Dr. Omar Jorge Ibarra Rojas

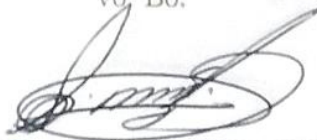
Revisor



Dr. Leonardo Gabriel Hernández Landa

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, abril 2017

*A Natalia, mi motivación para continuar cada día.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	3
1.2. Objetivo . . . . .	4
1.3. Hipótesis . . . . .	4
1.4. Contribución . . . . .	4
1.5. Metodología . . . . .	5
1.6. Estructura de la tesis . . . . .	6
<b>2. Marco teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Accesibilidad . . . . .	7
2.2. Problemas de optimización . . . . .	11
2.2.1. <i>Vehicle Routing Problem</i> . . . . .	13
2.2.2. <i>Selective Vehicle Routing Problem</i> . . . . .	15

2.2.3. Problemas con cobertura . . . . .	16
2.3. Problemas de distribución en logística humanitaria . . . . .	18
<b>3. Formulación propuesta</b>	<b>23</b>
3.1. Descripción del problema . . . . .	24
3.2. Medida de desempeño . . . . .	26
3.3. Formulación matemática . . . . .	27
<b>4. Metodología</b>	<b>31</b>
<b>5. Resultados y análisis</b>	<b>34</b>
5.1. Experimentación preliminar . . . . .	35
5.2. Comparación . . . . .	36
5.3. Resultados del algoritmo . . . . .	40
<b>6. Conclusiones</b>	<b>49</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	49
6.2. Trabajo a futuro . . . . .	50
<b>A. Resultados para el MTP</b>	<b>52</b>
<b>B. Resultados para el AVRP</b>	<b>54</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1. Problema de Ruteo de Vehículos . . . . .	14
2.2. <i>Median Tour Problem</i> . . . . .	17
2.3. <i>Maximal Covering Tour Problem</i> . . . . .	17
3.1. Radios de cobertura y desplazamiento . . . . .	26
5.1. Rutas para el caso 7 según la importancia del elemento de la medida.	35
5.2. Comparación del caso AVRP16_1. . . . .	37
5.3. Comparación del caso AVRP16_5. . . . .	39
5.4. Comparación del caso AVRP_16_7. . . . .	39
5.5. Rutas para el ejemplo 2. . . . .	43
5.6. Rutas para el ejemplo 10. . . . .	46
5.7. Rutas para el ejemplo 4. . . . .	47
5.8. Rutas para el ejemplo 19. . . . .	47

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Variantes del VRP . . . . .	15
2.2. Objetivos para problemas de distribución en logística humanitaria . .	21
5.1. Resultados del MTP y el AVRP . . . . .	38
5.2. Comparación entre el método exacto y el heurístico . . . . .	41
5.3. Valores de los indicadores de accesibilidad para el método exacto. . .	43
5.4. Valores de los indicadores de accesibilidad para el método heurístico.	45
A.1. Resultados del MTP con el método exacto . . . . .	52
B.1. Resultados del AVRP con el método exacto . . . . .	54



# AGRADECIMIENTOS

---

Quiero agradecer primeramente a Margarita, por acompañarme durante la maestría, animarme en los momentos difíciles y por brindarme su amistad. Nos dimos cuenta muy tarde de que hacemos un buen equipo.

También quiero agradecer a mis papás que siempre y a pesar de todo han estado ahí para mí. A la sra. Tere y el sr. Alberto, a Daniel, Misael y Braython. Gracias por cuidar de mi niña mientras estaba en clases, por su gran apoyo y por darme así la oportunidad de seguir estudiando.

Además, agradezco a la Dra. Lucero por guiarme durante la maestría y en la elaboración de la tesis así como por las explicaciones y comentarios realizados para mejorar varios aspectos de las actividades realizadas en esta etapa. También al Dr. Omar y al Dr. Leonardo. A todos los maestros con los que tuve la fortuna de tomar clases, por compartir su experiencia y conocimientos. Especialmente a la Dra. Ilya quien en el primer tetramestre nos apoyó a Margarita y a mí con tareas extras, exposiciones y el curso de C-TPAT.

Por último, quiero agradecer el apoyo económico que me ofrecieron la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, la Universidad Autónoma de Nuevo León y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para costear los estudios de la maestría.

# RESUMEN

---

Melanie Solís Mata.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: DISTRIBUCIÓN DE AYUDA HUMANITARIA CON ACCESIBILIDAD  
COMO MEDIDA DE DESEMPEÑO.

Número de páginas: 64.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** Durante la distribución de suministros puede presentarse la situación en la cual la totalidad de los clientes no pueda ser atendida directamente, por lo que las personas que no fueron visitadas deban recorrer una distancia para obtenerlos. Existen varias consideraciones que se toman en cuenta en planeación urbana para lograr la accesibilidad de las personas a los lugares donde deben desplazarse y que pueden aplicarse en este caso como las oportunidades, la desagregación espacial y la distancia.

Los objetivos de este trabajo son entonces incrementar la accesibilidad de las personas a los suministros, es decir, que aquéllas puedan llegar a los lugares donde están los bienes, pero que éstos estén lo menos alejado posible de su punto de partida; que además tengan varias oportunidades a las cuales desplazarse; que las zonas que

no han sido visitadas estén lo más separadas entre sí y que se cubran la mayor cantidad de áreas.

La herramienta utilizada para la toma de decisiones es la Programación Lineal Entera Mixta que pertenece a las técnicas de optimización y que permite representar el problema mediante una formulación matemática que puede ser resuelta mediante algoritmos ya existentes.

**CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES:** Las contribuciones de este trabajo son: la propuesta de una medida de accesibilidad para el problema de distribución en el cual no se pueden visitar todas las zonas que requieren los suministros debido a un límite de tiempo la cual no había sido utilizada previamente en la literatura revisada; la comparación de soluciones cuando se incrementa la importancia de alguno de los elementos de esta medida; la elaboración de un algoritmo de resolución y el desarrollo del código para éste.

Podemos concluir que utilizando esta medida de accesibilidad se logra realizar una distribución equitativa, lo que hace que las personas en las áreas que no han sido atendidas puedan obtener más fácilmente los suministros. Debido a que el problema se vuelve imposible de resolver mediante *solver* comercial, se propuso un algoritmo de solución que arrojó una buena solución en un tiempo mínimo.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_

Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

El término «accesibilidad» es muy común en el área de planeación urbana y aunque no existe una definición exacta pues depende mucho del contexto, puede decirse que es la facilidad con la que las personas pueden llegar a un lugar. Generalmente se asocia con la distancia y/o el tiempo. En la planeación del transporte y de políticas sociales es en donde más se ha visto la necesidad de medir esa accesibilidad. Sin embargo, existe otro contexto en donde las medidas de accesibilidad toman importancia: en logística humanitaria.

Para las empresas, la logística es la coordinación de todas las actividades necesarias para ofrecer un producto o servicio al menor costo posible (Ballou, 2004). Según la Real Academia de la Lengua Española, es «una parte de la organización militar que atiende al movimiento y mantenimiento de las tropas en campaña» y un «conjunto de medios y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa o de un servicio, especialmente de distribución».

Entonces, la logística en el contexto de ayuda humanitaria puede definirse como: el proceso de planear, ejecutar y controlar de manera eficiente el flujo de efectivo y de bienes de ayuda, además del manejo de la información adecuada, con el fin de atender las necesidades de los cliente finales, es decir, las personas que se han visto afectadas por algún desastre ya sea natural (terremotos, huracanes) o

provocado por el hombre (guerras o ataques terroristas) (Gaytán *et al.*, 2012).

En los últimos años, la logística humanitaria ha tomado gran importancia debido a que se busca constantemente una manera de mejorar la atención a los afectados por un desastre, agilizando el proceso de alivio del sufrimiento de las personas mediante el pronto arribo de los suministros necesarios con el objetivo de minimizar la cantidad de pérdidas.

Para brindar una atención efectiva a las zonas afectadas por desastres, la logística humanitaria se divide en varias etapas de acuerdo a los niveles de decisión, que en la literatura se definen como: mitigación, preparación, respuesta y reconstrucción o recuperación. De estas, las que competen a los expertos en logística son las últimas tres.

Una de las actividades más importantes durante la fase de respuesta es la distribución pues ésta es la manera en que se entregan los bienes o servicios a los clientes por lo que es fundamental que se lleve a cabo del mejor modo posible. El proceso de toma de decisiones durante esta etapa presenta atributos de incertidumbre, un ambiente cambiante e incontrolable con poco tiempo tomar la decisión a partir de información escasa y con resoluciones generalmente irreversibles (Altay y Green, 2006). Es por esto que para que la etapa de respuesta sea exitosa, no puede ser improvisada (Van Wassenhove, 2006).

Para encontrar la mejor manera de realizar esta distribución, se han aplicado distintos problemas de optimización. Uno de los más utilizados es el *Vehicle Routing Problem* (VRP) o Problema de Ruteo de Vehículos, cuyos objetivos en logística humanitaria generalmente son:

- minimizar la demanda insatisfecha,
- minimizar el tiempo de llegada a los puntos afectados y
- minimizar los costos de distribución, aunque se le da una baja importancia.

El tema de seleccionar las rutas para la distribución ya ha sido tratado en la literatura de ayuda durante la etapa de respuesta luego de un desastre, aunque poco se ha hablado de la cuestión de acceso. En este trabajo se presenta una propuesta de un VRP que optimiza una medida de accesibilidad para el caso en el que es imposible atender directamente a todos los afectados pues se cuenta con una restricción de tiempo límite de entrega.

## 1.1 MOTIVACIÓN

La degradación del medio ambiente, la rápida urbanización y las enfermedades provocarán un incremento en los desastres, naturales y provocados por el hombre, de aquí la trascendencia de dominar los temas relacionados con cada etapa de la logística humanitaria.

Uno de los aspectos primordiales dentro de la etapa de respuesta, es la distribución de la ayuda. Si durante ésta se considera que algunos de los afectados no serán visitados por los vehículos y, por ende, no recibirán los suministros, es necesario asegurarse de que esas personas tengan «acceso» a los bienes.

Dado el poco tiempo que se tiene para reaccionar al desastre para salvar la mayor cantidad de vidas posible, se presenta como una formulación matemática así como un algoritmo de solución que ofrece una respuesta relativamente rápida y en el cual ya se tienen expresadas las consideraciones del problema por lo que se agiliza el proceso de toma de decisiones para la definición de las rutas de distribución.

Es por esto que la investigación se centra en el problema de distribución, pero abordándolo desde un nuevo enfoque, el de accesibilidad, pues además, éste es limitado en la literatura de logística humanitaria.

## 1.2 OBJETIVO

Aumentar la accesibilidad de las personas afectadas por un desastre a los suministros de ayuda mediante una herramienta de toma de decisiones para el problema de distribución de bienes de ayuda.

Entre los objetivos particulares de la medida de accesibilidad tenemos maximizar:

- la cantidad de oportunidades que tiene un área desatendida,
- el número de zonas cubiertas y
- la dispersión de los puntos desatendidos.

Así como minimizar la distancia entre un área desatendida y sus oportunidades.

## 1.3 HIPÓTESIS

Si se utilizan técnicas de Investigación de Operaciones así como una medida de accesibilidad que considera distancia, oportunidades y desagregación espacial es posible incrementar la facilidad con que las personas obtienen bienes o servicios en actividades de distribución.

## 1.4 CONTRIBUCIÓN

La medida de accesibilidad que optimiza el modelo matemático difiere de los objetivos encontrados en la literatura, pues incluye asuntos de planeación urbana como oportunidad e impedimento, con lo que se evita aislar a ciertas zonas de la población que no son visitadas debido a un límite de tiempo.

Se propone además un algoritmo para la resolución de problemas de mayores dimensiones que permite ofrecer una buena solución en un tiempo menor que un método exacto.

## 1.5 METODOLOGÍA

En primer lugar, se realiza una revisión de literatura para resaltar los puntos característicos de la logística humanitaria, los problemas tratados dependiendo de la etapa y los objetivos que se persiguen en las formulaciones matemáticas existentes.

En seguida, se determinan las cuestiones que se tomarán en cuenta para analizar la situación de la distribución de ayuda humanitaria como el tipo de flota, tiempos y zonas cubiertas y desatendidas.

A continuación, se define cada componente de la medida de desempeño que conforma el objetivo del modelo matemático para después presentar la formulación basada en un problema de ruteo de vehículos.

Una vez definida la formulación matemática, se tienen algoritmos de solución ya existentes por lo que se utiliza Visual Studio y CPLEX para realizar la experimentación que consiste en generar nodos aleatoriamente y correr el modelo con distintos pesos a cada elemento de la medida de accesibilidad para ver su comportamiento y realizar una comparación contra otro basado en distancias.

Después se presenta un algoritmo de búsqueda local y el análisis de los resultados para finalmente llegar a las conclusiones y trabajo a futuro.



## 1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este trabajo de investigación está organizado como sigue: en el capítulo 2 se tiene una revisión de los temas relacionados con accesibilidad y con los problemas de *Vehicle Routing Problem* y *Covering Tour Problem*, así como algunas de sus aplicaciones en el contexto de logística humanitaria. En el capítulo 3 se encuentran la descripción del problema y la formulación matemática propuesta. En el capítulo 4 se muestra la metodología de solución utilizada para resolver el problema presentado. En el capítulo 5 están los resultados obtenidos de comparar el problema propuesto con uno relacionado y las soluciones arrojadas por la metodología mencionada anteriormente. Por último, en el capítulo 6 se describen las conclusiones y el trabajo a futuro.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

---

En este capítulo se presentan los antecedentes consultados concernientes a la accesibilidad y su empleo en logística humanitaria. En primer lugar, se definen los temas concernientes a las medidas de accesibilidad. En seguida, se mencionan algunos problemas de optimización relacionados con el problema de enrutamiento de vehículos. Por último, se encuentra la sección acerca de los problemas que se han aplicado en distribución de ayuda y los objetivos más comunes de éstos.

## 2.1 ACCESIBILIDAD

Cuando hablamos de traslados en la ciudad, una de las dificultades que se presenta son las grandes distancias que generalmente deben ser recorridas para llegar a los destinos deseados, sin mencionar el tráfico y los diferentes medios de transporte que existen. La solución a los problemas relativos a estos recorridos puede enfocarse desde dos puntos de vista: el de movilidad y el de accesibilidad.

En el primer caso, como mencionan Boisjoly y El-Geneidy (2016), los estudios están interesados en la velocidad de traslado. El concepto se vincula a las personas o productos que se van a trasladar y es la facilidad de desplazamiento o una medida de los propios desplazamientos realizados que se indican como pasajeros/km o

toneladas/km.

El segundo enfoque es el de accesibilidad que incluye factores que afectan la capacidad de llegar a una ubicación. La accesibilidad se determina por la distribución espacial de los destinos potenciales u oportunidades, la facilidad para llegar a ellos, la magnitud, calidad y carácter de las actividades que ahí se encuentran (Handy y Niemeier, 1997).

Estas oportunidades son ubicaciones donde un individuo puede realizar actividades (necesidades) como compras, educación, trabajo, es decir, accesibilidad activa o de la persona. Por otro lado, el número de usuarios potenciales para una actividad como una tienda o escuela es la accesibilidad pasiva o de lugar. Las oportunidades pueden ser tratadas a nivel elemento (oportunidades desagregadas) o a nivel zona (oportunidades agregadas) (Cascetta *et al.*, 2016).

De estos enfoques podemos decir que la movilidad abarca el movimiento y la eficiencia del sistema de transporte, mientras que la accesibilidad habla de las personas y sus oportunidades. En este proyecto el tema que nos atañe es el de accesibilidad.

Scheurer y Curtis (2007) mencionan que, dependiendo del autor, podemos encontrar diversas definiciones de accesibilidad entre las que se encuentran:

- Geurs y van Wee (2004): «El grado en el cual el sistema de uso del transporte terrestre permite a los individuos o bienes llegar a actividades o destinos por medio de una combinación de modos de transporte». También consideran indicadores basados en actividad, en infraestructura y en utilidad.
- Bhat *et al.* (2000): «Una medida de la facilidad de un individuo de perseguir una actividad de un tipo deseado, en una ubicación deseada, de un modo deseado y en un momento determinado».
- Bertolini *et al.* (2005): «La cantidad y diversidad de lugares que pueden ser alcanzados dentro de un tiempo y un costo establecidos de recorrido».

Entonces la accesibilidad puede ser entendida como la facilidad con la que se alcanza un destino deseado dado un número de oportunidades disponibles y una intrínseca impedancia a los recursos utilizados para trasladarse desde el origen hasta el destino (Bocarejo y Oviedo, 2012).

El término de accesibilidad ha sido utilizado en cuestiones de planeación urbana, de uso de la tierra y de transporte y toma un papel relevante en la creación de políticas. Es aquí donde nace la necesidad de definir una medida para esa accesibilidad.

Estas medidas pueden ser utilizadas como un indicador social si muestran la disponibilidad de oportunidades sociales y económicas para los individuos, es decir, el acceso a los recursos esenciales para su existencia como trabajo, comida, salud, etc., además de utilizarse en el desarrollo del transporte y la planeación de políticas para el funcionamiento de la sociedad en general (Geurs y van Wee, 2004).

La mayoría de las medidas consisten de dos partes: transporte (resistencia o impedancia) determinado por la calidad del servicio, tiempo de traslado, costo y distancia; y la actividad (motivación, atracción) y cómo están distribuidas y la variedad de ellas (Handy y Niemeier, 1997).

En Papa *et al.* (2016), Geurs y van Wee (2004) y Handy y Niemeier (1997) encontramos diversas perspectivas básicas para medir la accesibilidad:

- Medidas basadas en infraestructura: analizan el desempeño de la infraestructura del transporte como el nivel de congestión y la velocidad promedio de traslado.
- Medidas basadas en ubicación: describen el nivel de accesibilidad a las actividades espacialmente distribuidas. Existen diferentes medidas de este tipo como las de distancia o las de gravedad que pondera las oportunidades de acuerdo a la impedancia, el tiempo de traslado o costos.
- Medidas basadas en la persona: son las actividades en las cuales un individuo

puede participar en cierto momento.

- Medidas basadas en utilidad: calculan el beneficio económico obtenido al acceder a ciertas actividades que están distribuidas espacialmente. La probabilidad de que una persona elija cierta oportunidad va a depender de la utilidad de la elección relativa a la utilidad de todas las elecciones posibles.
- Medidas de contorno o acumulativas: representan la accesibilidad de una ubicación a otra o a un conjunto de destinos contando la cantidad de oportunidades que pueden alcanzarse en cierto tiempo.
- Medidas de red: se basan en la teoría de grafos.

Debido a las diferentes situaciones, no existe una medida de accesibilidad general, pues dependerá del enfoque se maneje (Makrí y Folkesson, 1999). Además, las diferentes perspectivas de las categorías de indicadores de accesibilidad difieren en su nivel de complejidad y aplicabilidad práctica (Papa *et al.*, 2016).

La medida de accesibilidad más sencilla es la de distancia, donde, por ejemplo, el destino más cercano es el de mayor accesibilidad. La estimación de las distancias entre dos ubicaciones puede realizarse de múltiples maneras, desde distancias directas hasta mediante formulaciones más complejas que consideren impedancia de traslado (Makrí y Folkesson, 1999).

Song (1996) define la accesibilidad integral como «la suma de accesibilidad relativa sobre todos los destinos posibles dividido entre la atracción total del área en cuestión». La accesibilidad relativa es simplemente la atracción de cierta ubicación menos la función de impedimento.

Mientras que Cascetta *et al.* (2016) proponen que la accesibilidad integral es la cantidad promedio de oportunidades disponibles, es decir, que se perciben como una ubicación potencial dentro de las restricciones de espacio-tiempo de un individuo que está ubicado en cierto punto y que desea satisfacer una necesidad.

Luego, (Makrí y Folkesson, 1999) presentan la fórmula en (2.1) que es una forma de medir la accesibilidad integral de un área  $i$ , definida esta última como:

$$A_i = \frac{\sum_j a_j f(d_{ij})}{A} \quad (2.1)$$

Donde:  $a_j$  es la atracción de las zonas  $j$ ;  $d_{ij}$  es el tiempo, la distancia o el costo necesario para ir de  $i$  a  $j$ ;  $f(d_{ij})$  es la función de impedancia, frecuentemente utilizando el inverso del tiempo y  $A$  es un factor de estandarización.

En general, en las medidas de accesibilidad el costo, el medio de transporte y la variedad son muy importantes, por ejemplo, el tiempo y dinero que requiere llegar a una oportunidad. Este enfoque está relacionado con el transporte y la planeación urbana y se busca que las personas puedan recorrer una mayor cantidad de lugares con poco esfuerzo.

## 2.2 PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

Los problemas de optimización tratan de obtener el valor mínimo o máximo de una función variable, que a su vez se expresa en relación con otras variables que se encuentran presentes en las restricciones del problema. Es decir, se busca responder a las preguntas: ¿cuál es el objetivo que se desea maximizar o minimizar? y ¿qué es lo que restringe mi problema? (Espinosa *et al.*, 2009).

En el caso de la logística humanitaria, existen diversos tipos de problemas que se presentan dependiendo de las situaciones y de la emergencia que se esté tratando. Algunos de ellos son:

- Ubicación de instalaciones: para dar una respuesta adecuada, es importante determinar las ubicaciones de las instalaciones a donde llegarán los suministros de ayuda de manera que se pueda dar una rápida atención a los afectados. Beamon y Balcik (2005) y Jaller y Holguín-Veras (2013) en sus trabajos presentan una formulación matemática para la ubicación de centros de distribución

y sus capacidades con objetivo de minimizar los tiempos de respuesta y costos sociales del esfuerzo para llegar a la ayuda, respectivamente.

- Administración de inventarios: una de las actividades a realizar es pre-posicionar los suministros de ayuda para que estén disponibles durante la respuesta al desastre. Estos productos, como indican van Wyk *et al.* (2011), deben satisfacer las necesidades inmediatas de los afectados como lo es el agua, medicinas, tiendas de campaña y otros artículos relacionados. Balcik y Beamon (2008) y Ozbay y Erman (2007) son otros de los autores que han manejado el tema de inventarios.
- Transporte y Distribución: El transporte y la distribución son dos de los asuntos más importantes en la logística humanitaria, ya que gracias a estos se hace llegar los productos necesarios a las víctimas de algún desastre. Generalmente, se busca minimizar el tiempo de respuesta a la emergencia.

Debido a las características y complejidad de la logística humanitaria, se vuelve un área de competencia de la Investigación de Operaciones (IO). Shen *et al.* (2009) mencionan el papel tan importante de la IO al momento de optimizar problemas logísticos, además de que, en el caso de la respuesta a una emergencia, es necesario un método cuantitativo para guiar y evaluar la situación, para decidir qué acciones deben ser realizadas.

La IO busca desarrollar y aplicar herramientas y técnicas, utilizando el método científico, con el fin de encontrar la mejor solución (óptima) para problemas de diferentes áreas. Nació como una técnica militar durante la Segunda Guerra Mundial con el objetivo de asignar recursos que eran escasos a maniobras y actividades militares de una forma eficaz. Ha tenido un desarrollo en los últimos años debido a las mejoras que se hicieron a las técnicas con las que ya se contaban desde sus orígenes militares y a la facilidad que implica el uso computadoras para resolver los problemas que son muy largos y tediosos, por no decir imposibles, si se realizan manualmente (Hillier y Lieberman, 2006).

Una de las herramientas que se utilizan en la IO son los modelos matemáticos los cuales están compuestos por tres elementos: alternativas, criterio objetivo y restricciones. Las situaciones son diferentes para los detalles de construcción de cada componente y la solución resultante del modelo (Taha, 2012). Una revisión de literatura sistemática sobre la aplicación de modelos en problemas de logística humanitaria la hacen Habib *et al.* (2016).

Algunos problemas de la etapa de respuesta pueden ser representados mediante formulaciones matemáticas para analizar las opciones de configuración de la red de distribución de ayuda humanitaria en donde se incluyan las opciones de ubicación de los almacenes, los diferentes tipos de vehículos de los que se dispone y la distancia y sus efectos en el costo de la distribución, así como la mejor asignación de los recursos para atender a la mayor cantidad de personas.

En las próximas secciones se mencionan los problemas de enrutamiento de vehículos y algunas variaciones que han sido ampliamente utilizados para el transporte y la distribución de suministros en el área de logística humanitaria en la etapa de respuesta y en los cuales está basada la formulación propuesta en el capítulo siguiente.

### 2.2.1 *Vehicle Routing Problem*

Nos mencionan Jozefowicz *et al.* (2008) que el VRP se refiere a un problema en el cual, dado un conjunto de nodos que deben ser visitados, se busca generar un recorrido para esa red, sujeto a un conjunto de restricciones y que busca optimizar uno o más objetivos. El VRP se define según:

- La red: se dice que es simétrica cuando las rutas entre dos puntos puede recorrerse en ambas direcciones; asimétrica cuando sólo puede irse en una sola dirección o mixta que es una red donde hay rutas que pueden visitarse en dos sentidos y otras que no.



- La demanda: puede estar definida y ser fija o estocástica cuando no se conoce exactamente cuánto necesita el punto de demanda.
- La flota: cuando todos los vehículos son iguales se cuenta con una flota homogénea. Por el contrario, si hay de diferentes tipos será heterogénea.
- Costos: pueden definirse por uso de vehículos, por distancias, o tiempos.
- Objetivos: el problema puede tener uno o varios.

En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de cómo luce una red en un problema de ruteo.

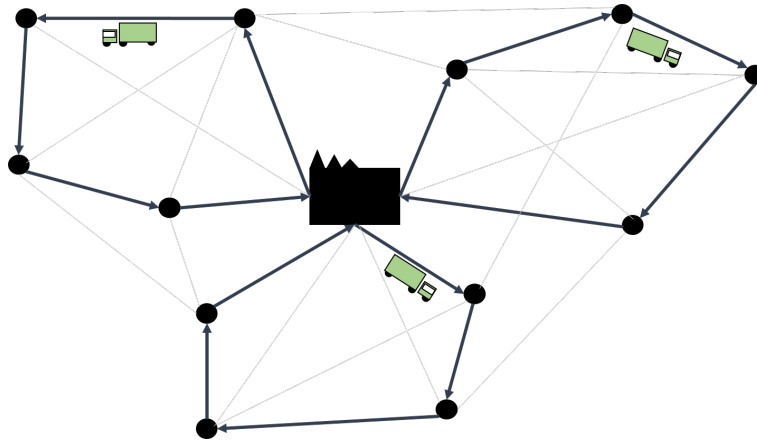


Figura 2.1: Problema de Ruteo de Vehículos

El primer trabajo relacionado al VRP fue de Dantzig y Ramser (1959) y a partir de este problema base se dependen algunas variantes de las cuales encontramos referencia en Lüer *et al.* (2009) y Rocha *et al.* (2011) mostradas en la tabla 2.1.

Los problemas de ruteo de vehículos son aplicables en el contexto de logística humanitaria durante la etapa de respuesta porque permite definir la mejor manera de utilizar las rutas para entregar la ayuda a los afectados en un tiempo razonable. Debido a que en ocasiones no se pueden visitar todas las zonas afectadas, se han adaptado los objetivos del VRP clásico. Dos de estas variantes son los problemas de ruteo de vehículos selectivo y de cobertura que se explican a continuación.

Variante	Descripción
<i>Multiobjective</i> (MOVRP)	Considera varios objetivos, generalmente en conflicto.
VRP with Time Windows (VRPTW)	El cliente se debe atender dentro de un intervalo de tiempo.
VRP with Backhauls (VRPB)	Los clientes tienen valores asociados de demanda y de retorno de mercancía.
Open VRP (OVRP)	Los vehículos no tienen que regresar al depósito.
<i>Split Delivery VRP</i> (SDVRP)	Un mismo cliente puede ser atendido por diferentes vehículos.
<i>Periodic VRP</i> (PVRP)	Extiende el periodo de planeación a $M$ días.
<i>Stochastic VRP</i> (SVRP)	Algunos de sus elementos son aleatorios.
<i>Selective VRP</i>	Restricción de tiempo de ruta.
<i>Multi Trip VRP</i>	Cada vehículo puede realizar varias rutas en el mismo periodo de planeación.
<i>Multi Capacity VRP</i> (MCVRP)	Se transporta más de una cantidad de objetos a la vez.
<i>Multi-Depot VRP</i> (MDVRP)	Existen varios depósitos desde donde atender a los clientes.

Tabla 2.1: Algunas variantes del problema de ruteo de vehículos

### 2.2.2 *Selective Vehicle Routing Problem*

Este problema consiste en recorrer una cierta cantidad de nodos. Sin embargo, no todos deben ser visitados debido a un límite de tiempo, pero se obtiene una recompensa por cada uno que sí se visite (Defryn *et al.*, 2016). En la literatura este problema se conoce como *The Selective Travelling Salesperson Problem*, *The Maximum Collection Problem* u *Orienteering Problem* (OP). En el *Team Orienteering Problem* o *Multiple Tour Maximum Collection Problem* (MTMCP) se busca deter-

minar  $p$  caminos, cada uno con un límite de tiempo, de manera que se maximice la puntuación total. Este corresponde a jugar al *Orienteering* donde hay equipos de varias personas cada uno (Vansteenwegen *et al.*, 2011).

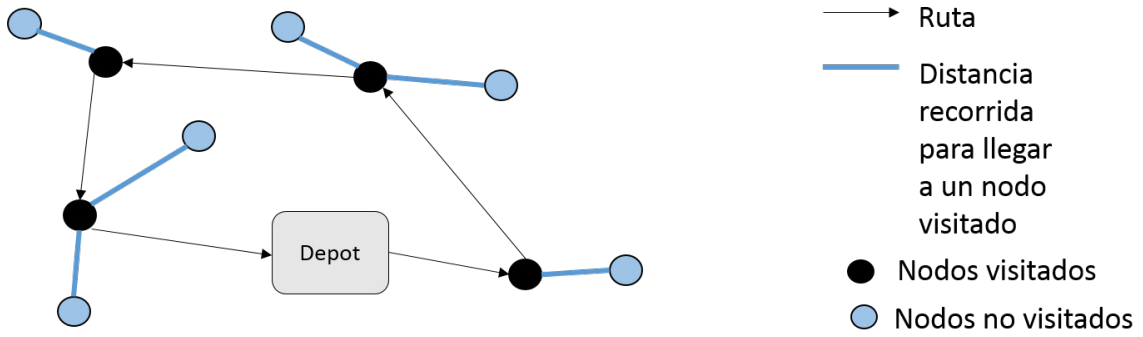
Por otro lado, Defryn *et al.* (2016) proponen el *Selective Vehicle Routing Problem* en el cual se tiene un límite para la cantidad de vehículos disponibles y la distancia que cada uno debe recorrer. Por último, en el *Generalized Orienteering Problem* (GOP), cada punto de tiene una puntuación que varía con respecto a ciertos atributos comparados con los otros *checkpoints* (Wang, Golden & Wasil, 2008).

El modelo que se propone en este trabajo es similar al OP en la generación de rutas con un límite de tiempo, sin embargo, el objetivo de este son maximizar las puntuaciones obtenidas por recorrer los nodos seleccionados en el límite de tiempo, en lo cual difiere de nuestra formulación matemática.

### 2.2.3 PROBLEMAS CON COBERTURA

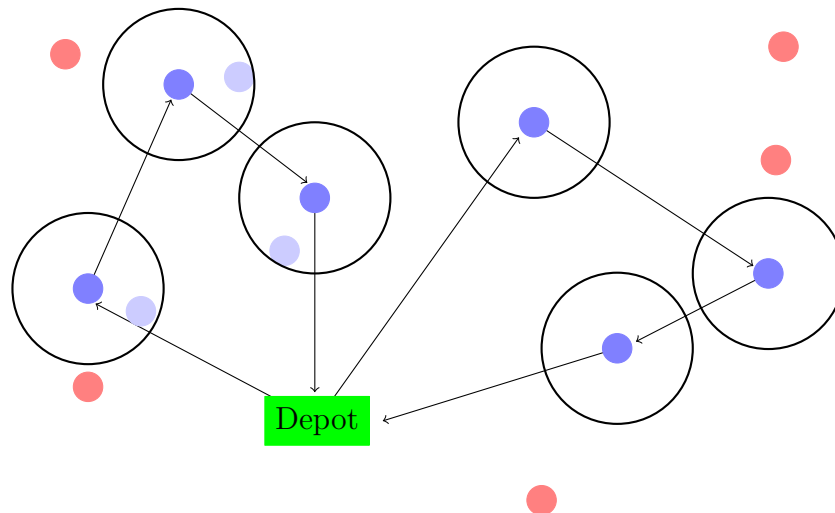
Current y Schilling (1994) presentan dos problemas bicriterio. En ambos se tiene una red con  $n$  nodos, y un valor  $p$  ( $p \leq n$ ) buscando identificar cómo realizar un tour visitando  $p$  de los  $n$  nodos. En resumen, se debe determinar: cuáles  $p$  nodos deben incluirse en el tour y la mejor manera de realizarlo visitando los nodos seleccionados. Sin embargo, se maneja también el tema del acceso en uno de sus objetivos, que son: 1) minimizar la longitud total de la ruta y 2) maximizar la accesibilidad de los  $n - p$  nodos que no son incluidos en el recorrido.

El primero de estos problemas es el *Median Tour Problem* (MTP), representado en la figura 2.2, donde la accesibilidad se maneja con el objetivo de minimizar la distancia que deben recorrer los nodos que no son visitados para llegar al nodo más cercano que esté dentro del tour. Es una variante del *p-Median Problem* que consiste en ubicar  $p$  instalaciones de manera que se minimice la distancia promedio ponderada entre las zonas de demanda y su instalación seleccionada más cercana

Figura 2.2: *Median Tour Problem*

(Daskin y Maass, 2015).

El segundo es el *Maximal Covering Tour Problem* (MCTP) en donde la accesibilidad es tratada de manera que se busca minimizar la demanda total ubicada en los nodos que quedan fuera de una distancia predefinida a los nodos que sí son visitados. Este es un caso especial del MTP. En la figura 2.3 se muestra un ejemplo del MCTP, donde los puntos dentro de cierto radio de los nodos visitados por ruta se consideran cubiertos. Church y ReVelle (1994) presentan el *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) que consiste en maximizar la cantidad de población cubierta dentro de una distancia de servicio deseada por una cierta cantidad fija de instalaciones.

Figura 2.3: *Maximal Covering Tour Problem*

Gendreau *et al.* (1997) presentan *The Covering Tour Problem* (CTP), el cual

está relacionado al MTP y el MCTP. En él se busca determinar la mínima longitud de recorrido de manera que todos los nodos no visitados estén dentro de una distancia predefinida a los que están en ruta. Una generalización del CTP la presentan Jozefowiez *et al.* (2007) en el *Bi-Objective Covering Tour Problem*.

Estos conceptos de cobertura y de mínima distancia recorrida desde los nodos no atendidos a uno en ruta, ha sido utilizado en la literatura de logística humanitaria debido a su amplio campo de aplicación como el envío de ayuda luego de un desastre o la distribución de servicios de salud. Algunos ejemplos de este problema y de los mencionados en los apartados previos, se explican enseguida.

## 2.3 PROBLEMAS DE DISTRIBUCIÓN EN LOGÍSTICA HUMANITARIA

Los costos, ya sea por recorrido, por mantener inventario, por abrir una instalación o los tres, son un aspecto primordial al momento de programar la distribución. Es por eso que Jozefowiez *et al.* (2008), Zhu *et al.* (2008), Barbarosoglu y Arda (2004), Jabbarzadeh *et al.* (2014), Balick *et al.* (2008), Allahyari *et al.* (2015) y Bozorgi-Amiri *et al.* (2013) manejan en su objetivo el minimizar los costos. Perez *et al.* (2010) presentan una formulación del SDVRP para minimizar el costo total de respuesta a la emergencia, el cual incluye costos operacionales (por recorrido de vehículos y manejo del producto) y consideraciones sociales (por privación de suministros al final de cada periodo).

Algunos autores consideran otras problemáticas dentro de la logística humanitaria como la cantidad de personas que no pueden ser visitadas directamente por un vehículo y, por lo tanto, no reciben los suministros. Así, el objetivo es minimizar esta demanda insatisfecha como en el caso de Yi y Ozdamar (2007), Salmerón y Apte (2010), De Angelis *et al.* (2007), Shen *et al.* (2009), Özdamar *et al.* (2004), Yi y Kumar (2007), Afshar y Haghani (2012), Lin *et al.* (2011) y Knott (1987).

Otros tantos, como Mete y Zabinsky (2010), Rawls y Turnquist (2010), Van Hentenryck *et al.* (2010) y Clark y Culkin (2007) incluyen ambos objetivos anteriores en sus problemas. Ahmadi *et al.* (2015) añade a estos dos objetivos el de minimizar el tiempo de ruta, o sea el tiempo que se visitan todas las zonas afectadas, que es otra de las funciones que buscan optimizarse. Autores como Viswanath y Peeta (2006) y Özdamar y Demir (2012) utilizan este objetivo en sus problemas de distribución. Un objetivo relacionado con el tiempo, es el de minimizar el promedio de llegada a todo un grupo de beneficiarios. Campbell *et al.* (2008), Flores *et al.* (2015) y Huang *et al.* (2013) optimizan esta función. Y dado que el tiempo y el costo van de la mano, Barbarosoglu *et al.* (2002), Vitoriano *et al.* (2011), Tzeng *et al.* (2007) y Wang *et al.* (2014) minimizan la duración total de la ruta y los costos asociados a la distribución.

En cuanto a problemas de cobertura se refiere, Hachicha *et al.* (2000) y Hodgson *et al.* (1998), basados en el CTP, proponen modelos para resolver el problema de la planeación de rutas de una o más unidades móviles de salud ubicadas en el distrito Suhum de Ghana. Los vehículos recorren una cantidad limitada de aldeas por lo cual se considera una restricción de distancia máxima que pueden desplazarse las personas que no fueron visitadas. Por su parte, Noltz *et al.* (2010) encontramos una aplicación del problema multiobjetivo de cobertura para minimizar el porcentaje de población que está fuera del radio predefinido de cobertura.

Doerner *et al.* (2007) presentan una formulación para encontrar una ruta cerrada para el problema de la unidad móvil de salud mencionado anteriormente. En esta extensión de los problemas de Hachicha *et al.* (2000) y Hodgson *et al.* (1998) el objetivo es minimizar el número de clientes que no están siendo cubiertos, la longitud del recorrido y la distancia total que recorren las personas para llegar a una zona visitada.

Por su parte, Naji-Azimi *et al.* (2012) presentan una generalización del CTP para la ubicación de Centros Satélite de Distribución, SDCs en inglés, que son lugares a donde llega la ayuda y que están dentro de una distancia predefinida a las personas

afectadas por algún desastre, de modo que puedan acercarse en busca de suministros. Algo similar encontramos en Flores *et al.* (2015) quienes proponen el *Multi- Vehicle Cumulative Covering Tour Problem* ( $m$ -CCTP) con el objetivo de minimizar la suma de los tiempos de arribo a los nodos, para poder dar pronta atención a las víctimas de algún desastre. Sin embargo, ellos manejan tres tipos de ubicaciones: obligatorias, que deben ser visitadas; opcionales, que se utilizan solo si son necesarias para cubrir las demandas; y las inalcanzables, que deben ser cubiertas al menos por alguna ubicación opcional. Por otro lado, Allahyari *et al.* (2015) proponen una generalización del MDVRP añadiendo la opción de cobertura en el *Multi-Depot Covering Tour Vehicle Routing Problem* (MDCTVRP) que puede aplicarse a la distribución de bienes entre personas afectadas por un desastre, donde la ayuda proviene de varios depósitos y no se pueden visitar todas las áreas debido a un límite de recursos. Los objetivos que manejan son: minimizar los costos por recorrido y ubicación de los afectados no visitados.

Otros objetivos encontrados en la revisión de literatura fueron los de minimizar la desviación de la ayuda enviada con respecto a la cantidad planeada, por Tirado *et al.* (2014); maximizar la satisfacción de la demanda, por Liberatore *et al.* (2014); maximizar la resiliencia colectiva de los supervivientes durante operaciones logísticas, por Sheu (2014); minimizar la probabilidad de robo y maximizar la mínima confiabilidad de cada enlace, por Vitoriano *et al.* (2009) y minimizar la toma de decisiones y tiempo de transporte del equipo necesario, por Chen *et al.* (2011).

En general, en los trabajos revisados durante este proyecto y en los reportados por la Torre *et al.* (2012) y Habib *et al.* (2016), mostrados en la tabla 2.2, pudimos observar cómo mediante adaptaciones del VRP y de problemas de cobertura es posible realizar la distribución de suministros de ayuda durante una emergencia.

Continúa en la siguiente página

Autor	Min demanda insatisfecha	Max la cobertura	Min distancia zonas	Min tiempo ruta	Min costo	Min tiempo promedio llegada
-------	--------------------------------	------------------------	---------------------------	-----------------------	--------------	-----------------------------------

Tabla 2.2: Objetivos para problemas de distribución en logística humanitaria

Autor	Min demanda insatisfecha	Max la cobertura	Min distancia zonas	Min tiempo ruta	Min costo	Min tiempo promedio llegada
Jozefowiez <i>et al.</i> (2008)					X	
Yi y Ozdamar (2007)	X					
Zhu <i>et al.</i> (2008)					X	
Mete y Zabinsky (2010)	X				X	
Rawls y Turnquist (2010)	X				X	
Salmerón y Apte (2010)	X					
Van Hentenryck <i>et al.</i> (2010)	X				X	
Barbarosoglu <i>et al.</i> (2002)				X	X	
Barbarosoglu y Arda (2004)					X	
Viswanath y Peeta (2006)				X		
Clark y Culkin (2007)	X				X	
De Angelis <i>et al.</i> (2007)	X					
Campbell <i>et al.</i> (2008)						X
Hodgson <i>et al.</i> (1998)		X	X		X	
Noltz <i>et al.</i> (2010)		X				X
Perez <i>et al.</i> (2010)					X	
Ahmadi <i>et al.</i> (2015)	X			X	X	
Lin <i>et al.</i> (2011)	X			X		
Shen <i>et al.</i> (2009)	X					
Özdamar <i>et al.</i> (2004)	X					
Campbell <i>et al.</i> (2008)						X
Hachicha <i>et al.</i> (2000)			X			
Doerner <i>et al.</i> (2007)			X	X		
Naji-Azimi <i>et al.</i> (2012)		X				
Yi y Kumar (2007)	X					
Vitoriano <i>et al.</i> (2011)				X	X	
Tzeng <i>et al.</i> (2007)				X	X	
Chen <i>et al.</i> (2011)						
Wang <i>et al.</i> (2014)				X	X	
Jabbarzadeh <i>et al.</i> (2014)					X	
Balick <i>et al.</i> (2008)					X	
Tirado <i>et al.</i> (2014)						
Liberatore <i>et al.</i> (2014)						
Sheu (2014)						
Afshar y Haghani (2012)	X					
Flores <i>et al.</i> (2015)						X

Continúa en la siguiente página



Autor	Min demanda insatisfecha	Max la cobertura	Min distancia zonas	Min tiempo ruta	Min costo	Min tiempo promedio llegada
Allahyari <i>et al.</i> (2015)					X	
Huang <i>et al.</i> (2013)						X
Bozorgi-Amiri <i>et al.</i> (2013)					X	
Özdamar y Demir (2012)				X		
Knott (1987)	X					

Sin embargo, la mayoría de los objetivos están relacionados con minimizar los costos de la respuesta y la demanda insatisfecha en el caso de que se considere que no se pueden visitar todas las zonas. Estos dos objetivos están en conflicto, pues para satisfacer la mayor cantidad de demanda requiere más tiempo de ruta, y una disminución en este último implica dejar más zonas sin ayuda. Más aún, cuando sólo se busca minimizar la demanda insatisfecha o distribuir la mayor cantidad de producto posible, no se está tomando en cuenta el tiempo que las personas estuvieron sin los suministros (Holguín-Veras, et al., 2013).

Algunos objetivos alternos que son perseguidos son los que buscan visitar todas las zonas en el menor tiempo posible, ya sea con un vehículo, de manera indirecta, es decir, siendo cubierta con un punto visitado o que se minimice la distancia que deben desplazarse las personas que no están en ruta hacia los puntos más cercanos que cuenten con ayuda. Estas últimas consideraciones son las que implican una forma de medir la accesibilidad de las personas fuera del recorrido, pues se desea mejorar la facilidad de los individuos para llegar a los bienes de ayuda. Algunas de estas ideas han sido retomadas, y otras han sido añadidas, para el problema propuesto en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO 3

# FORMULACIÓN PROPUESTA

---

En este capítulo se presenta la formulación matemática para un problema de distribución aplicado al área de logística humanitaria. Se muestran los supuestos a dicha formulación así como los conjuntos, variables, y parámetros del modelo, además de una explicación de lo que implica la función objetivo y cada una de las restricciones.

Se optimiza una medida de accesibilidad para personas afectadas por un desastre que no pueden visitarse y se ven obligadas a desplazarse en busca de suministros.

La accesibilidad, en este caso, puede entenderse como la definición que presentan Bertolini *et al.* (2005) mientras que la medida utilizada para cuantificarla incluye una función de impedimento para las personas fuera de ruta, la cual, según Makrí y Folkesson (1999), la distancia es la más sencilla de todas. También se utiliza la idea de cobertura como se define desde Current y Schilling (1994) en el MCTP y Gendreau *et al.* (1997) en el CTP.

De acuerdo a la revisión de literatura, ya se habla de accesibilidad desde Current y Schilling (1994) en el MTP. Sin embargo, el objetivo de optimizar una medida como la que se propone en los siguientes apartados no ha sido tratado en logística humanitaria.

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Dado un conjunto de zonas que demandan ayuda humanitaria, determinar las rutas de distribución que respeten un límite de tiempo tal que se optimice una medida de accesibilidad. Debido a esa restricción de duración de la ruta, es imposible visitar todas las áreas afectadas. Los supuestos que se manejan para definir nuestro problema son:

- Existe suficiente ayuda para repartir entre los afectados y la demanda es conocida.
- La flota que se maneja es homogénea, es decir, todos los vehículos son iguales.
- Las zonas afectadas son visitadas máximo una vez.
- Los vehículos parten de un solo depósito.
- Debido a que la aplicación es en la etapa de respuesta, las zonas afectadas, los caminos disponibles entre cada una y sus respectivos tiempos de recorrido son conocidos.

Se considera además, que cada una de las zonas tiene dos radios diferentes: uno de cobertura o la distancia para la cual las zonas adyacentes a uno que está en ruta se consideran atendidos también; y el otro es el radio de desplazamiento, o sea, la distancia que las personas de un área, en caso de no ser visitado por ruta ni estar en el radio de cobertura de otro, pueden recorrer para llegar a uno que sí fue visitado.

También se utilizan los términos de zona cubierta, desatendida y de oportunidad para otro punto de demanda:

- Un área se considera que ha sido cubierta indirectamente, y por lo tanto atendida, si está dentro del radio de cobertura de otra que sí ha sido visitada por ruta.

- Un área está desatendida si no es visitada por ruta ni está dentro del radio de cobertura de otra zona.
- Una oportunidad es una zona que ha sido visitado por un vehículo y está dentro del radio de desplazamiento de un punto desatendido.

De acuerdo a lo anterior descrito, las zonas afectadas se representan mediante el conjunto  $I$  para el cual se consideran dos subconjuntos:  $I_1$  para los nodos atendidos, es decir, que tienen ayuda directa o indirectamente; y el subconjunto  $I_2$  que son los nodos que están desatendidos.

Para una zona  $i \in I$  se considera un conjunto  $A(i)$  de nodos a los cuales las personas pueden acudir en busca de ayuda, es decir, que están dentro del radio de desplazamiento. Y otro conjunto  $N(i)$  que son las áreas que se consideran atendidas al cubrirse por  $i$ .

Mediante la figura 3.1 se explicarán los términos antes mencionados. Las zonas 1, 2, 3, 4 y 5 han sido visitadas directamente por los vehículos (los cuales parten del depósito indicado como el 0) y por lo tanto, para cada una se toma en cuenta el radio de cobertura, indicado por la línea punteada en azul. Por su parte, el nodo 12 está siendo cubierto indirectamente por la zona 2, mientras que los puntos 6 y 11, por la 5. Es decir,  $N(2) = \{12\}$  y  $N(5) = \{6, 11\}$ . Como 1, 2 y 4 no cubren a nadie,  $N(1) = N(3) = N(4) = \phi$ .

Por otro lado, los nodos 7, 8, 9, y 10 están desatendidos de acuerdo a la definición antes presentada. Sin embargo, se considera el radio de desplazamiento para cada uno de ellos, que se indica con la línea punteada en rojo. Para el caso de la zona 8, las personas en ésta pueden ir a 1 y 10; mientras que las de la zona 7 pueden ir a 4,5,6 y 11. Por lo tanto,  $A(8) = \{1, 10\}$  y  $A(7) = \{4, 5, 6, 11\}$ . No obstante, 8 tiene únicamente una oportunidad, la zona 1 que está en ruta, la cual comparte con 9 y 10. Similarmente, para 7 solo tiene dos oportunidades: 4 y 5, ya que 6 y 11 están cubiertas indirectamente por 5.

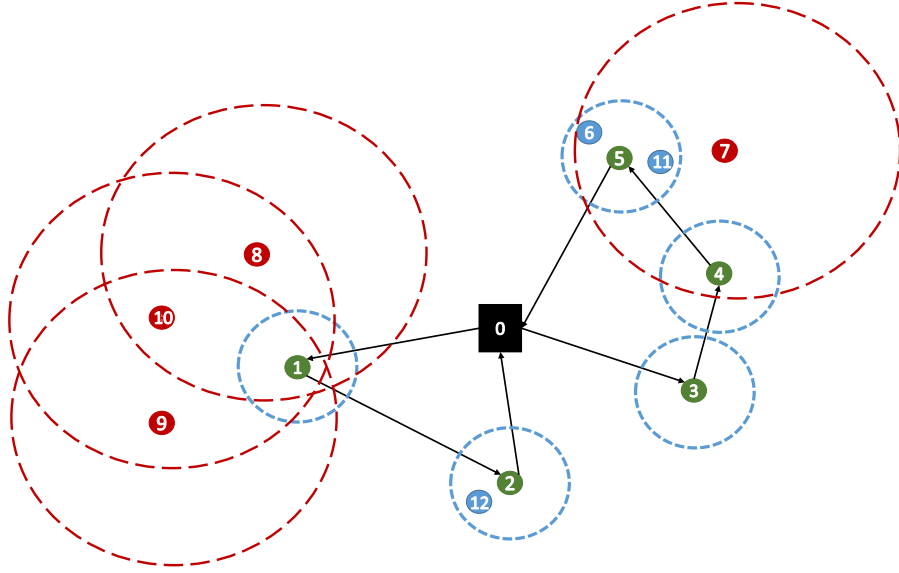


Figura 3.1: Red que ejemplifica los radios de cobertura y de desplazamiento.

## 3.2 MEDIDA DE DESEMPEÑO

La medida de accesibilidad que se optimiza cuenta con los siguientes componentes:

- Tiempo: entre las áreas afectadas y las que están en ruta, pues las personas desatendidas preferirán acercarse al área visitada más cercana a ellas. Es por eso que se propone, como en otros estudios, utilizar el inverso del tiempo como medida de impedimento  $f(t_{ij}) = \frac{1}{t_{ij}}$ . Esta medida toma los valores:

$$d_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ está atendido} \\ \frac{\sum_{j \in I_1 \cap A(i)} f(t_{ij})}{\sum_{j \in A(i)} f(t_{ij})} & \text{si } i \text{ está desatendido} \end{cases}$$

- Número de oportunidades: la medida de accesibilidad maximiza el número de zonas visitadas dentro del radio de desplazamiento de los nodos desatendidos.
- Distancia a oportunidad más cercana: ésta se mide para las zonas desatendidas hacia una que sí esté cubierta directamente y que esté lo más próxima posible.

- Indicador de dispersión: para evitar aglomeraciones de áreas desatendidas alrededor de los nodos en ruta como en la figura 3.1, para el caso del nodo 1 el cual es la única opción que tienen las zonas 8, 9 y 10. Para lograr lo anterior, se maximiza el tiempo mínimo entre cada zona deasatendida.
- Indicador de zonas visitadas y cubiertas: maximiza la cantidad de nodos que están en ruta y los que se cubren indirectamente con éstos.

Entonces, el Problema de Ruteo de Vehículos con Accesibilidad (AVRP por sus siglas en inglés) determina los mejores recorridos para una determinada flota homogénea de tamaño conocido, considerando una longitud de ruta limitada de manera que la medida de accesibilidad  $A(I_1; I_2)$  se maximice.

### 3.3 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

En esta sección se presenta la formulación matemática propuesta para el problema descrito anteriormente. Comenzamos definiendo los conjuntos, variables y parámetros. Posteriormente se presenta el modelo con una descripción de la función objetivo y de sus restricciones.

- Conjuntos:

$I = \{i/i = 0, 1, 2, \dots, n\}$ : Nodos afectados por el desastre. 0 representa el depósito de donde parten los vehículos.

$N_{(i)}$ : Nodos  $j$  que están dentro del radio de cobertura de  $i$ .

$A_{(i)}$ : Nodos  $j$  a los que los afectados en  $i$  puede desplazarse si no se visita ni se cubre.

- Variables:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la ruta va de la zona } i \text{ a la } j. \\ 0 & \text{si no.} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si la zona } i \text{ se cubre o es visitado por ruta.} \\ 0 & \text{si no.} \end{cases}$$

$$z_i = \begin{cases} 1 & \text{si la zona } i \text{ está en ruta} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$v_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ no está cubierta y } j \text{ es la oportunidad más cercana} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$u_i$ : tiempo de ruta acumulado justo antes de visitar  $i$  ( $u_0 = 0$ ).

$d_i$ : indicador basado en distancia y ubicación de las oportunidades para  $i$ .

$s$ : indicador basado en la dispersión de las zonas no cubiertas.

$n_i$ : distancia desde las zonas desatendidas a la oportunidad más cercana.

$o_i$ : cantidad de oportunidades de la zona desatendida  $i$ .

■ Parámetros:

$k$ : cantidad de vehículos disponibles.

$t_{ij}$ : tiempo necesario para ir de la zona  $i$  a la  $j$ .

$T$ : tiempo máximo de duración de la ruta.

$M$ : número positivo apropiadamente grande.

$w_i$ : peso asignado a cada elemento de la medida de acceso.

■ Modelo:

Maximizar

$$\sum_{i \in I - \{0\}} (w_1 y_i + w_2 d_i - w_3 n_i + w_4 o_i) + w_5 s \quad (3.1)$$

s.a.

$$\sum_{i \in I - \{0\}} x_{0i} = \sum_{i \in I - \{0\}} x_{i0} \leq k \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in I} x_{ij} = \sum_{j \in I} x_{ji} \leq 1 \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.3)$$

$$u_i + t_{ij} \leq u_j + T(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in I, j \in I - \{0\}, j \neq i \quad (3.4)$$

$$u_i \leq T \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in I} x_{ij} = z_i \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.6)$$

$$\sum_{j: i \in N(j)} z_j + z_i \leq M_1 y_i \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.7)$$

$$y_i \leq \sum_{j: i \in N(j)} z_j + z_i \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.8)$$

$$v_{ij} \leq z_j \quad \forall i, j \in I - \{0\} \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in A(i)} v_{ij} = 1 - y_i \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.10)$$

$$d_i = \frac{\sum_{j \in A(i)} \frac{z_j}{t_{ij}}}{\sum_{j \in A(i)} \frac{1}{t_{ij}}} + y_i \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.11)$$

$$n_i = \sum_{j \in A(i)} v_{ij} t_{ij} \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.12)$$

$$o_i \leq \sum_{j \in A(i)} z_j \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.13)$$

$$o_i \leq |A(i)| (1 - y_i) \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.14)$$

$$s \leq t_{ij} + M_2(y_i + y_j) \quad \forall i, j \in I - \{0\}, j \neq i \quad (3.15)$$

$$x_{ij}, v_{ij}, y_i, z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in I, j \neq i \quad (3.16)$$

$$d_i \in (0, 1) \quad \forall i \in I \quad (3.17)$$

$$o_i \in \mathbb{Z} \cup \{0\} \quad \forall i \in I \quad (3.18)$$

$$u_i, n_i, s_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (3.19)$$



La función objetivo (3.1) maximiza la suma ponderada de los indicadores de accesibilidad basados en zonas cubiertas, distancia a las oportunidades más cercanas, cantidad de oportunidades de las zonas desatendidas y la dispersión de estas.

Las restricciones (3.2) indican que deben utilizarse máximo los  $k$  vehículos disponibles para realizar la distribución. (3.3) obligan a que las zonas se visiten a lo más una vez y aseguran el flujo de los vehículos. Las restricciones (3.4) y (3.5) miden el tiempo acumulado de ruta antes de visitar cada nodo y garantizan que sea menor o igual a  $T$ . (3.6) definen a  $z_i$  mientras que (3.7) y (3.8), a  $y_i$ . (3.9) y (3.10) aseguran que cada zona desatendida tenga solo una oportunidad más cercana. Las restricciones (3.11), (3.12), (3.13), (3.14), (3.15) están relacionadas con la medida de accesibilidad basada en distancia, oportunidades y dispersión. (3.16), (3.17) y (3.18) son restricciones de estado.

## CAPÍTULO 4

# METODOLOGÍA

---

Este capítulo se presentan los algoritmos de solución utilizados para la resolución de la formulación matemática presentada anteriormente. Como se mencionó en el apartado precedente, para ejemplos mayores a 18 nodos el problema se vuelve intratable en CPLEX. Es por esto que se propone el algoritmo 1 para resolver problemas de tamaños mayores y en un tiempo considerable. Para implementarlo es necesario obtener una solución inicial a partir de un algoritmo constructivo el cual selecciona de una lista ordenada descendientemente dependiendo de la cantidad de zonas cubiertas y de cuántos nodos pudieran acceder a cada uno. Se insertan las zonas con mayor y que representen el mínimo incremento en la longitud de la ruta, mientras sea factible.

Después se aplica el algoritmo 1 el cual consiste en realizar una disminución del tiempo de ruta para posteriormente agregar las zonas que mejoren los indicadores de oportunidades y cobertura. Para esto se utilizan los movimientos de intercambio e inserción que se explican a continuación.

El movimiento de intercambio, presentado en 2, consiste en seleccionar cada una de las zonas en la ruta original para verificar qué sucede en cuanto al tiempo si se realiza un intercambio con alguna de las zonas que está cubriendo. Si la duración del recorrido disminuye al intercambiar la posición del nodo visitado con uno que

**Algorithm 1:** *Algoritmo*


---

```

Sean  $I_1$  zonas en ruta,  $I_c$  zonas cubiertas y  $L = \{i \in I_1\}$  ;
 $s \leftarrow$  solución del constructivo ;
 $f(s)$  función objetivo de  $s$  ;
while  $L \neq \emptyset$  do
    Seleccionar  $i \in L$ ;  $m$  es la zona anterior,  $n$ , la siguiente y  $k$  la ruta de  $i$  ;
     $K = \{j \in N(i) \cap I_c\}$  ;
    while  $K \neq \emptyset$  do
         $s = s^*$  ;
         $s^* \leftarrow$  Intercambio ( $s^*, i, j, m, n, k$ ) ;
         $s^* \leftarrow$  Insercion( $s^*$ ) ;
        if  $f(s^*) \geq f(s)$  then
             $\perp$  Actualizar  $s = s^*$ 
        Actualizar  $K = K - \{j\}$ 
    Actualizar  $L = L - \{i\}$ 

```

---

está dentro de su radio de cobertura y además el valor de la función objetivo es igual o mejor, se actualiza la ruta eliminando el primero para sustituirlo por el segundo.

El movimiento de inserción, cuyo pseudocódigo está en 3, cuenta para cada nodo fuera de ruta el número de zonas desatendidas que pueden acercarse a él, los ordena de manera decreciente e intenta insertarlos en algún recorrido que aún tenga tiempo disponible, dando prioridad a los nodos no cubiertos.

Mediante este algoritmo de solución se llevó a cabo la experimentación para resolver algunos ejemplos y obtener una solución en un tiempo menor que con un solver comercial. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo siguiente.

**Algorithm 2:** *Intercambio*( $s^*, i, j, m, n, k$ )

Sean  $Time_k$  la duración de la ruta  $k$ ,  $T$  el tiempo límite de ruta y

$Tiempo_{ab}$  lo que toma ir de la zona  $a$  a la  $b$ . ;

**if**  $Tiempo_{mj} + Tiempo_{jn} < Tiempo_{mi} + Tiempo_{in}$  **then**

Quitar  $i$  de la ruta y sustituirlo por  $j$  ;

Actualizar  $x_{mi} = x_{in} = 0$ ;  $z_i = y_i = 0$  ;

$y_w = 0 \quad \forall w \in \{N(i) - \bigcup_{h \neq i: z_h=1} N(h)\}$  ;

Actualizar  $x_{mj} = x_{jn} = 1$ ;  $z_j = y_j = 1$ ;

$y_w = 1 \quad \forall w \in N(j)$ ;

Actualizar  $Time_k = Time_k + t_{mj} + t_{jn} - t_{mi} - t_{in}$ ;

Actualizar  $f(s^*)$

**Algorithm 3:** *Inserción*( $s^*$ )

Sean  $I_2$  las zonas que no están en ruta,  $Time_k$  la duración de la ruta  $k$ ,  $T$

el tiempo límite de ruta y  $L = \{i \in I_2\}$

Ordenar  $L$  de manera decreciente respecto a  $|\{j : i \in A(j), y_j = 0\}|$  ;

**while**  $Time_k \leq T$  y  $L \neq \emptyset$  **do**

Seleccionar el primer  $i \in L$ , su ruta  $k$ , la zona previa  $m$  y la zona siguiente  $n$  ;

**if**  $Time_k + t_{mi} + t_{in} - t_{mn} \leq T$  **then**

Insertar  $i$  entre  $m$  y  $n$  en la ruta  $k$ . ;

Actualizar  $x_{mi} = x_{in} = 1$ ;  $x_{mn} = 0$  ;

$y_i = z_i = 1$ ;  $y_j = 1 \quad \forall j \in N(i)$  ;

Actualizar  $L = L - \{i\}$

## CAPÍTULO 5

# RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

Este capítulo incluye la forma en que se verificó la formulación matemática presentada en la sección anterior. En la primera sección se muestra la experimentación realizada variando las ponderaciones de los elementos de la medida de accesibilidad. En la segunda tenemos una comparación realizada con el modelo de Current y Schilling (1994) que incluye las diferencias entre ambos modelos. Por último, se encuentran los resultados arrojados por el algoritmo de solución propuesto.

Se generaron diferentes casos de prueba de 16 y 19 nodos —donde uno de ellos es el depósito— los cuales se etiquetaron como AVRPX\_P donde  $X$  representa la cantidad de nodos y  $P$  el número de ejemplo. Las zonas están distribuidas dentro de una malla de 60 por 60 en 3 áreas. Ninguna de éstas se superponen y en cada una se generaron aleatoriamente las coordenadas de 5 puntos. Se estableció el límite de duración de ruta como 60, se tiene una disponibilidad de 2 vehículos y se calculó el tiempo de recorrido entre cada nodo. Los radios de cobertura y de desplazamiento son 6 y 18, respectivamente.

La experimentación se realiza con ILOG CPLEX 12.6.3 y Visual Studio 2013 en una computadora con memoria RAM de 8.00 GB y procesador Intel 1.70 GHz. Se utilizan casos pequeños para visualizar la manera en que cambian las rutas y los indicadores cuando se varían los pesos de cada elemento. Para los problemas que se

resolvieron con el método exacto, el tiempo fue de 3 horas.

## 5.1 EXPERIMENTACIÓN PRELIMINAR

En la primera parte de la fase de experimentación se lleva a cabo la verificación del comportamiento de cada uno de los elementos de la medida de accesibilidad, la cual se realizó mediante 10 ejemplos de 16 nodos cada uno. Se ejecutó el programa para cada caso variando los pesos de cada elementos con lo que se presentaron algunos cambios en las rutas y en los indicadores de cobertura, oportunidades y distancia dependiendo de cuál tenía una importnacia mayor. Por ejemplo, en la figura 5.1 se muestran los resultados para el caso AVR<sub>RP</sub>\_16\_7.

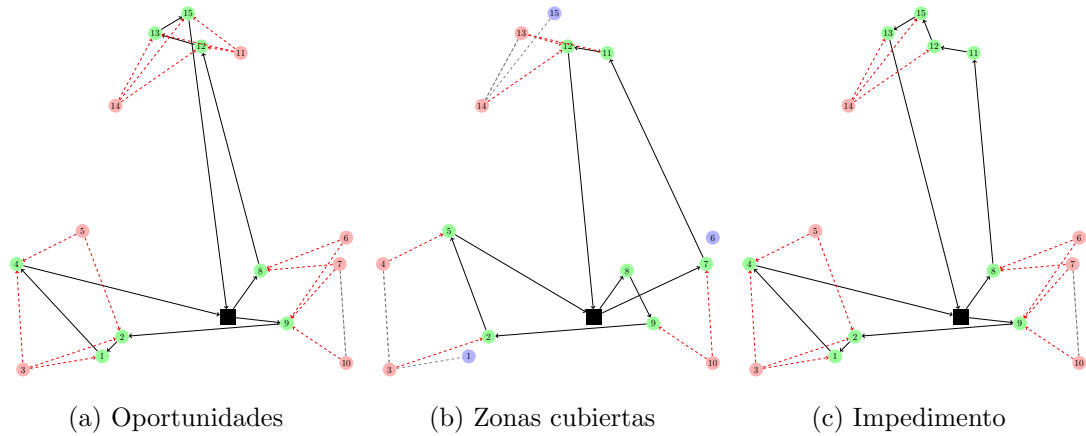


Figura 5.1: Rutas para el caso 7 según la importancia del elemento de la medida.

En la figura 5.1a se incrementó el peso del elemento de número de oportunidades, mientras que en las figuras 5.1b y 5.1c se aumentó la importancia de la cobertura y del elemento basado en distancia, respectivamente. Se observa que cuando se le da una mayor importancia al elemento de número de oportunidades existen más zonas desatendidas. Sin embargo, todas las zonas, a excepción de una, tienen al menos una oportunidad a diferencia de la figura 5.1b en la cual tres zonas tienen solamente una oportunidad. Una situación distinta se tiene en la figura 5.1c pues existen 6 áreas desatendidas, una menos que en 5.1a, además de que tienen al menos dos oportuni-

dades, excepto el nodo 10, y mejora la distancia que recorren las personas en esas áreas no cubiertas.

Similarmente, se analizaron los resultados de los otros 9 problemas y a partir de esta experimentación, se fijaron los pesos como  $w_1 = 250$ ,  $w_2 = 100$ ,  $w_3 = w_4 = w_5 = 1$  con el fin de priorizar los elementos de la medida de accesibilidad como zonas cubiertas, medida basada en distancia, distancia a la oportunidad más cercana, número de oportunidades y desagregación espacial. Cabe mencionar que la importancia asignada a cada uno de estos elementos puede modificarse dependiendo de la situación y del tomador de decisiones.

## 5.2 COMPARACIÓN

Una vez realizado el ajuste de parámetros, se realiza una comparación con el MTP de Current y Schilling (1994), el cual se mencionó en la sección anterior con el objetivo de minimizar la distancia que recorren las personas hasta la oportunidad más cercana. En la tabla 5.1 están los resultados de esta comparación. En cuanto al porcentaje de nodos cubiertos, los resultados son similares. Las diferencias se presentan en el indicador de oportunidades pues para el AVRP es igual o mejor que en el MTP. Empero, este último tiene una distancia menor entre una zona desatendida y su oportunidad más cercana y una mayor dispersión de los nodos no visitados. En cuanto al contraste de las funciones objetivos, se debe a que en el AVRP se toman en cuenta más consideraciones que en el MTP.

Para visualizar lo que se exhibe en la tabla anterior, en la figura 5.2 tenemos el caso AVRP16.1. El cambio está en las zonas superiores pues mientras que en 5.2a la zona 13 y la 11 están desatendidas y la 15 cubierta indirectamente en 5.2b las primeras están en ruta y las 15 y 12, desatendidas. A pesar de que los indicadores mínimos y máximos de las oportunidades son iguales, en la tabla 5.1 notamos que el mínimo valor del impedimento del MTP refiere que alguna zona desatendida no

puede acceder a todas las áreas dentro de su radio de desplazamiento porque éstas no están en ruta, lo que sucede para los nodos 11 y 13. Por otro lado, la distancia a las oportunidades es menor en el MTP a la vez que las zonas desatendidas están más dispersas.

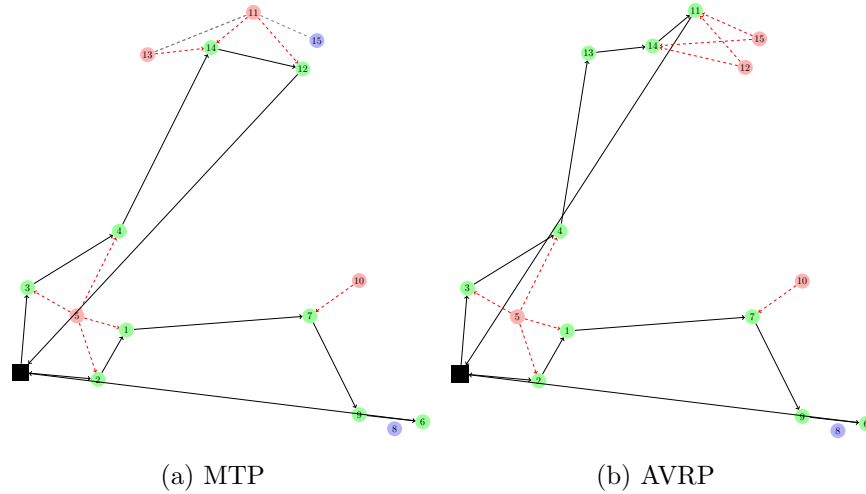


Figura 5.2: Comparación del caso AVR16.1.

Para el ejemplo AVR16.5 en 5.3 vemos que la diferencia radica en los recorridos y en la distribución de las zonas desatendidas y cubiertas, siendo igual el porcentaje de nodos cubiertos. Sin embargo, el mínimo indicador de impedimento nos dice que la zona desatendida no tiene todas las zonas en su radio de desplazamiento en ruta para el MTP.

Por otro lado, en la figura 5.4 se encuentra la solución del ejemplo AVR16.7 la cual muestra una diferencia en las rutas y en las zonas desatendidas. En la parte de arriba del resultado del MTP hay una aglomeración que no existe en el AVR16.7 pero en el primero las distancias a la oportunidad más cercana son menores que en el problema propuesto en este trabajo.

Como se puede observar en la comparación realizada, la diferencia radica en la manera en que se distribuyen las zonas desatendidas y las rutas que se siguen dependiendo del problema que se resuelva. También la manera en que se tienen las



Tabla 5.1: Resultados del MTP y el AVRP

Ejemplo	Problema resuelto	Función objetivo	Nodos cubiertos	Impedimento		Oportunidades		Op. más cercana		Des. espacial
				Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
AVRP16_1	MTP	241	73.33 %	0.5899	1	1	4	7	10	16
	AVRP	4592	73.33 %	1	1	1	4	8	11	5
AVRP16_2	MTP	223	73.33 %	0.378	1	1	2	10	17	9
	AVRP	4281	73.33 %	0.378	1	1	3	10	17	9
AVRP16_3	MTP	181	66.67 %	0.675	1	1	2	10	17	3
	AVRP	4108	66.67 %	0.675	1	1	2	10	17	3
AVRP16_4	MTP	267	80 %	0.758	1	2	3	8	15	17
	AVRP	4657	80 %	0.758	1	2	3	8	15	17
AVRP16_5	MTP	344	93.33 %	0.797	1	3	3	6	6	-
	AVRP	5470	93.33 %	1	1	4	4	9	9	-
AVRP16_6	MTP	231	73.33 %	0.444	1	1	3	7	16	12
	AVRP	4389	73.33 %	0.444	1	1	3	9	16	12
AVRP16_7	MTP	198	66.67 %	0.319	1	1	2	6	15	11
	AVRP	3925	66.67 %	0.300	1	1	2	7	16	12
AVRP16_8	MTP	241	73.33 %	0.378	1	1	2	6	11	4
	AVRP	4292	73.33 %	0.378	1	1	2	6	11	4
AVRP16_9	MTP	189	66.67 %	0.345	1	1	1	7	17	4
	AVRP	3914	66.67 %	0.345	1	1	1	7	17	4
AVRP16_10	MTP	270	80 %	0.642	1	1	2	6	13	19
	AVRP	4760	80 %	0.642	1	1	2	6	13	19

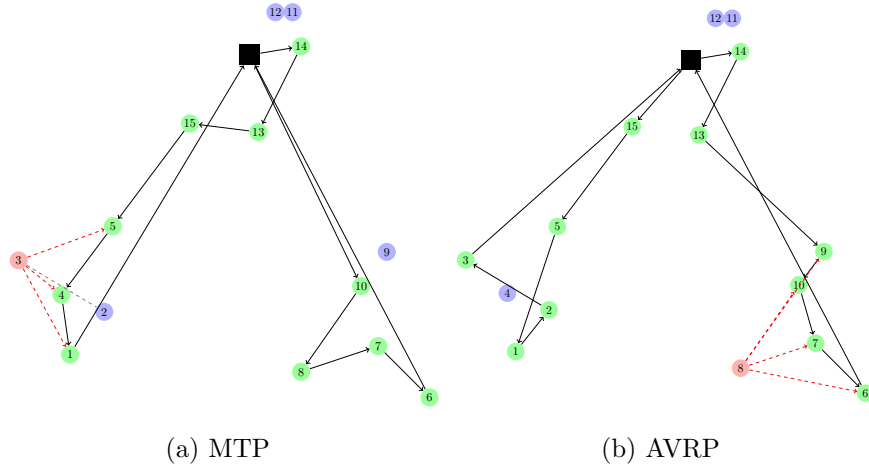


Figura 5.3: Comparación del caso AVR16\_5.

oportunidades porque en el AVR16\_5 se mejora la cantidad de ellas pues el indicador de impedimento busca que se incluyan, cuando sea posible, todas las zonas que estén dentro del radio de desplazamiento de una zona no visitada.

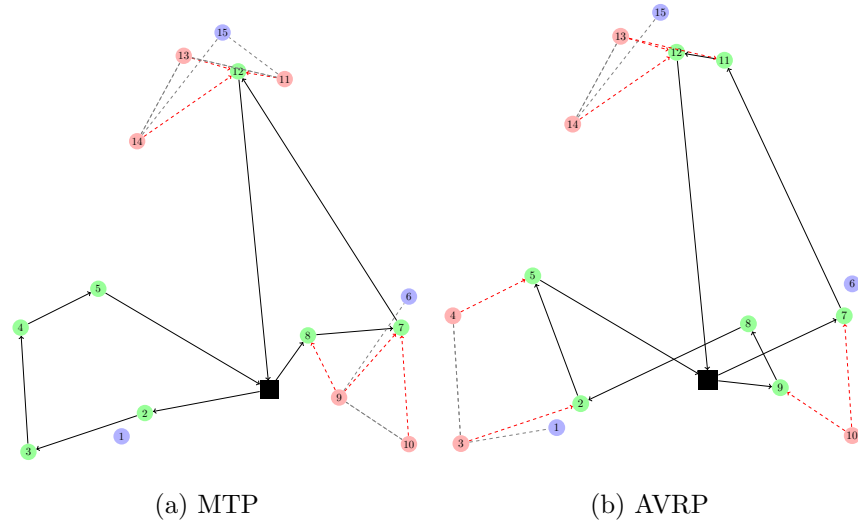


Figura 5.4: Comparación del caso AVR16\_7.

A pesar de que estos problemas se ejecutaron durante 3 horas, el cual ya es un tiempo considerable, con el *solver* utilizado el problema se vuelve intratable a partir de 18 nodos con tres vehículos por lo cual se aplicaron los algoritmos de solución presentados en el capítulo anterior y cuyos resultados se explican a continuación.

### 5.3 RESULTADOS DEL ALGORITMO

Para probar el algoritmo propuesto, se utilizaron los casos de 16 y 19 nodos que fueron generados de la forma descrita en secciones anteriores. Se compararon las soluciones obtenidas del método exacto contra las obtenidas con el heurístico.

En la tabla 5.2 se encuentra una comparación de las función objetivo, el tiempo de ejecución y el GAP. El valor de la función objetivo y el GAP son mejores en el método exacto que en el heurístico. A pesar de esto, la diferencia entre ellos es pequeña, a excepción de los casos donde la función objetivo es negativa porque la penalización por nodos desatendidos y las zonas aisladas sin oportunidades afectan el resultado en la solución del heurístico. Sin embargo, el tiempo en el que se consiguen las soluciones sí es muy distinto, pues el método exacto tomó desde un poco menos de una hora hasta tres horas, contra la fracción de segundos del heurístico.

Aunque el GAP del heurístico en algunos ejemplos pudiera hacer pensar en una mala solución, los porcentajes de nodos cubiertos son similares, como se muestra en las tablas 5.3 y 5.4. Este indicador se denota como NC mientras que, para algún nodo desatendido, MinA1, MaxA1; MinA2, MaxA2; Min A3, Máx A3 y A4 se refieren al valor mínimo y máximo de las medidas de impedimento, oportunidades, distancia a la oportunidad más cercana y desagregación espacial, respectivamente.

Lo que se puede apreciar es que el porcentaje de nodos cubiertos es similar en ambos métodos. En cuanto a las oportunidades, en la mayoría de los casos es mejor la solución del heurístico. Para el indicador de oportunidad más cercana, el algoritmo presenta una buena solución, salvo para los ejemplos donde la función objetivo es negativa, pues significa que una zona puede no tener oportunidades.

Tabla 5.2: Comparación entre el método exacto y el heurístico

Ejemplo	Método exacto			Método heurístico		
	Función	Tiempo	GAP	Función	Tiempo	GAP
	objetivo	(seg.)		objetivo	(seg.)	
AVRP16_1	4592	10513.7	0.84 %	3816.22	0.000706	21.34 %
AVRP16_2	4281	10884.6	35.90 %	3989.61	0.000945	45.83 %
AVRP16_3	4108	788.98	0.51 %	3889.46	0.000745	6.16 %
AVRP16_4	4657	7590.61	1.00 %	4395	0.00074	7.02 %
AVRP16_5	5470	9075.22	0.02 %	4997	0.001043	9.49 %
AVRP16_6	4389	10888.3	14.74 %	3786.27	0.000768	33.01 %
AVRP16_7	3925	10920.2	27.92 %	-6621.51	0.000851	-175.83 %
AVRP16_8	4292	10882	35.53 %	4455.64	0.000945	30.55 %
AVRP16_9	3914	8680.95	0.38 %	-17129.7	0.000795	-122.94 %
AVRP16_10	4760	10875.5	14.90 %	4463.24	0.00112	22.53 %
AVRP19_1	3296	10858	108.59 %	-58093.1	0.000704	-111.83 %
AVRP19_2	4984	10868.5	37.86 %	-5521.6	0.001037	-224.44 %
AVRP19_3	4979	10865.8	37.98 %	4544.27	0.00071	51.18 %
AVRP19_4	3882	10871.3	77.00 %	-6967.61	0.001208	-198.61 %
AVRP19_5	5076	10911.9	35.38 %	4613.72	0.00109	48.95 %
AVRP19_6	6002	10874.8	14.50 %	5028	0.000833	36.67 %
AVRP19_7	3097	10866.8	121.89 %	-16173.8	0.001109	-142.49 %
AVRP19_8	5278	10870.6	30.16 %	4883.28	0.001037	40.68 %
AVRP19_9	4880	10878.9	40.82 %	4704.25	0.001036	46.08 %
AVRP19_10	6078	10871.8	13.03 %	5552.96	0.001093	23.72 %
AVRP19_11	4666	10870.7	47.30 %	4402.79	0.001079	56.11 %
AVRP19_12	5357	10868.7	28.22 %	-4991.69	0.001013	-237.61 %
AVRP19_13	5724	10874.6	20.00 %	4434.48	0.001028	54.90 %
AVRP19_14	5601	10876.5	22.67 %	5172.44	0.001003	32.84 %

Continúa en la siguiente página

Problema	Método exacto			Método heurístico		
	Función	Tiempo	GAP	Función	Tiempo	GAP
	objetivo	(seg.)		objetivo	(seg.)	
AVRP19_15	5370	10869.7	27.97 %	-5256.54	0.00078	-230.73 %
AVRP19_16	5250	10878.4	30.88 %	4791.29	0.000792	43.41 %
AVRP19_17	3995	10871.6	71.99 %	-36351.3	0.000885	-118.90 %
AVRP19_18	5835	10877.6	17.74 %	5463.84	0.001334	25.74 %
AVRP19_19	-5156	10877.9	-233.24 %	-15417.2	0.001587	-144.56 %
AVRP19_20	4364	10875.6	57.45 %	4219.69	0.000966	62.83 %
AVRP19_21	4632	10881.8	48.32 %	4176.09	0.000945	64.51 %
AVRP19_22	4357	10884.2	57.70 %	-15393.3	0.001888	-144.64 %
AVRP19_23	5349	10882.6	28.44 %	5058.21	0.001145	35.82 %
AVRP19_24	3637	10876	88.97 %	-16281.3	0.000933	-142.21 %
AVRP19_25	5913	10872.4	16.20 %	-4939.06	0.001421	-239.12 %
AVRP19_26	4518	10873.2	52.10 %	4145.42	0.000833	65.77 %
AVRP19_27	4878	10873.1	40.84 %	4225.67	0.000713	62.58 %
AVRP19_28	5594	10870.5	22.81 %	5380.63	0.000941	27.68 %
AVRP19_29	5335	10875.6	28.79 %	5114.26	0.001237	34.35 %
AVRP19_30	4725	10869.6	45.42 %	-5417.31	0.001934	-226.83 %

Algunas situaciones se muestran en imágenes para visualizar lo ocurrido. Por ejemplo, en la figura 5.5 existe la misma cantidad de áreas desatendidas, pero en la solución del heurístico las personas de algunas zonas desatendidas deben ir hasta una más alejada y tienen menos oportunidades.

En otras ocasiones, como en los casos AVRP19\_5, AVRP19\_10 y AVRP19\_14, el porcentaje de nodos cubiertos es menor en la solución del heurístico, pero los otros indicadores son iguales o mejores, por lo que para las áreas que están desatendidas, existe un beneficio en cuanto a los lugares a los cuales pueden desplazarse.

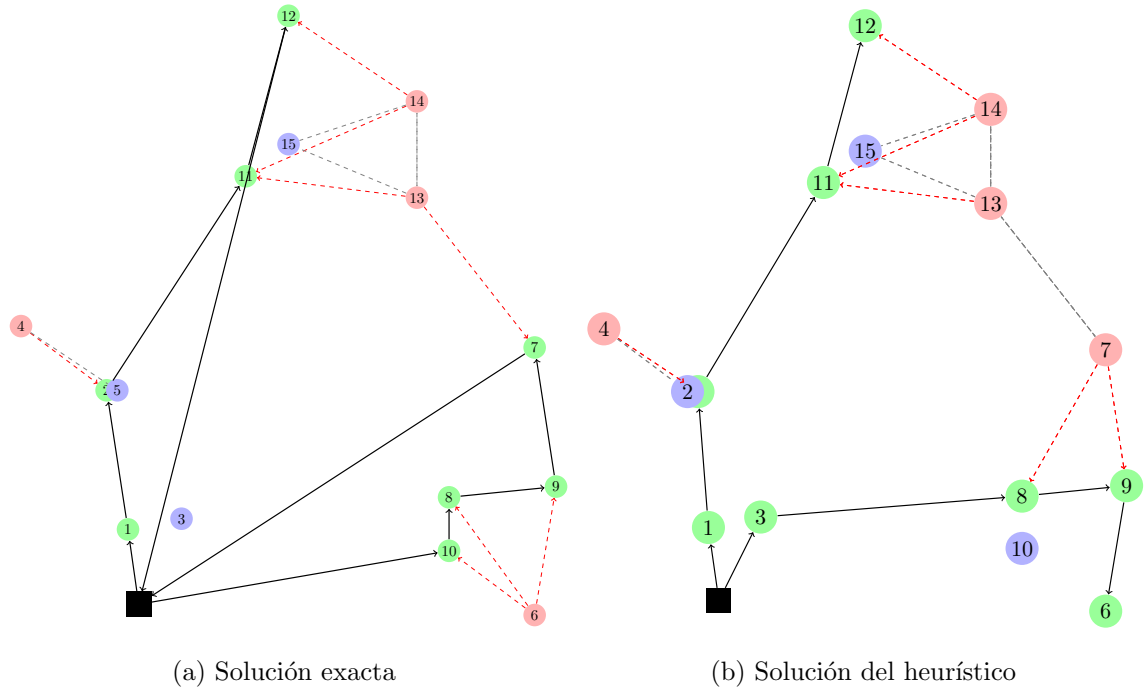


Figura 5.5: Rutas para el ejemplo 2.

Tabla 5.3: Valores de los indicadores de accesibilidad para el método exacto.

Ejemplo	Método exacto							
	NC	MinA1	MáxA1	MinA2	MáxA2	MinA3	MáxA3	A4
AVRP16.1	73.33 %	1.000	1	1	4	8	11	5
AVRP16.2	73.33 %	0.378	1	1	3	10	17	9
AVRP16.3	66.67 %	0.675	1	1	2	10	17	3
AVRP16.4	80 %	0.758	1	2	3	8	15	17
AVRP16.5	93.33 %	1.000	1	4	4	9	9	-
AVRP16.6	73.33 %	0.444	1	1	3	9	16	12
AVRP16.7	66.67 %	0.300	1	1	2	7	16	12
AVRP16.8	73.33 %	0.378	1	1	2	6	11	4
AVRP16.9	66.67 %	0.345	1	1	1	7	17	4
AVRP16.10	80 %	0.642	1	1	2	6	13	19
AVRP19.1	44.44 %	0.236	1	1	4	6	16	8
AVRP19.2	72.22 %	0.308	1	1	3	10	12	13
AVRP19.3	72.22 %	0.313	1	1	3	8	14	9

Continúa en la siguiente página

Ejemplo	NC	Método exacto						A4
		MinA1	MáxA1	MínA2	MáxA2	MínA3	MáxA3	
AVRP19_4	55.56 %	0.264	1	1	4	8	16	4
AVRP19_5	72.22 %	0.416	1	1	3	10	16	9
AVRP19_6	88.89 %	0.596	1	3	3	6	9	42
AVRP19_7	38.89 %	0.163	1	1	3	9	18	3
AVRP19_8	72.22 %	0.540	1	1	3	7	16	5
AVRP19_9	72.22 %	0.381	1	2	3	7	15	5
AVRP19_10	88.89 %	0.385	1	1	3	16	16	37
AVRP19_11	61.11 %	0.421	1	2	4	6	16	6
AVRP19_12	77.78 %	0.531	1	1	3	7	16	27
AVRP19_13	83.33 %	0.560	1	1	3	8	10	26
AVRP19_14	83.33 %	0.535	1	2	3	9	13	8
AVRP19_15	72.22 %	1.000	1	1	2	6	18	3
AVRP19_16	77.78 %	0.214	1	1	4	7	10	7
AVRP19_17	55.56 %	0.171	1	1	4	6	17	4
AVRP19_18	83.33 %	0.433	1	1	5	10	17	45
AVRP19_19	72.22 %	0.000	1	0	1	12	22	2
AVRP19_20	61.11 %	0.274	1	1	3	6	15	3
AVRP19_21	66.67 %	0.217	1	1	4	7	16	5
AVRP19_22	61.11 %	0.272	1	1	1	7	16	3
AVRP19_23	77.78 %	0.500	1	1	3	7	11	9
AVRP19_24	50 %	0.261	1	1	2	7	15	4
AVRP19_25	83.33 %	1.000	1	1	3	6	16	21
AVRP19_26	66.67 %	0.308	1	1	2	8	17	6
AVRP19_27	72.22 %	0.587	1	2	4	9	18	8
AVRP19_28	83.33 %	0.266	1	1	3	11	17	10
AVRP19_29	77.78 %	0.364	1	1	3	9	14	8
AVRP19_30	66.67 %	0.173	1	1	4	6	14	4

En la imagen 5.8 se encuentra el ejemplo AVRP19\_10. En la solución del heurístico existe una zona más que está desatendida que en el método exacto, por lo cual el porcentaje de nodos cubiertos es menor en el primero. No obstante, el área desatendida añadida tiene casi todas sus oportunidades además de que son

próximas; para otra zona desatendida todos los nodos dentro de su radio de desplazamiento están en ruta con lo que se disminuye también su distancia a recorrer en busca de suministros y se incrementan los valores de los indicadores de impedimento y oportunidad.

Tabla 5.4: Valores de los indicadores de accesibilidad para el método heurístico.

Ejemplo	NC	Método heurístico						A4
		MinA1	MáxA1	MínA2	MáxA2	MínA3	MáxA3	
AVRP16_1	66.67 %	0.385	1	2	6	7	16	10
AVRP16_2	73.33 %	0.195	1	2	4	12	17	9
AVRP16_3	66.67 %	0.675	1	2	4	10	17	3
AVRP16_4	80 %	0.485	1	4	6	10	17	8
AVRP16_5	93.33 %	1.000	1	6	6	9	9	-
AVRP16_6	66.67 %	0.444	1	2	4	9	16	12
AVRP16_7	60 %	0.000	1	0	4	6	19	11
AVRP16_8	80 %	0.636	1	4	4	6	10	4
AVRP16_9	53.33 %	0.000	1	0	2	9	30	5
AVRP16_10	80 %	0.642	1	2	4	6	13	19
AVRP19_1	27.78 %	0.000	1	0	6	6	39	7
AVRP19_2	66.67 %	0.000	1	0	6	8	20	10
AVRP19_3	66.67 %	0.313	1	2	6	8	15	9
AVRP19_4	44.44 %	0.000	1	0	4	7	19	4
AVRP19_5	66.67 %	0.517	1	2	6	9	16	6
AVRP19_6	77.78 %	0.197	1	2	4	7	16	9
AVRP19_7	55.56 %	0.000	1	0	8	7	26	4
AVRP19_8	72.22 %	0.223	1	2	6	6	13	5
AVRP19_9	72.22 %	0.134	1	2	4	7	17	3
AVRP19_10	83.33 %	0.810	1	4	8	7	16	37
AVRP19_11	61.11 %	0.421	1	4	8	6	16	6
AVRP19_12	77.78 %	0.000	1	0	4	7	19	7
AVRP19_13	66.67 %	0.174	1	2	8	7	15	0
AVRP19_14	77.78 %	0.535	1	4	8	7	13	8
AVRP19_15	72.22 %	0.000	1	0	4	6	21	3
AVRP19_16	72.22 %	0.214	1	2	8	7	10	7
AVRP19_17	55.56 %	0.000	1	0	4	8	25	7

Continúa en la siguiente página



Ejemplo	NC	Método heurístico						
		MinA1	MáxA1	MínA2	MáxA2	MínA3	MáxA3	A4
AVRP19_18	83.33 %	0.353	1	4	6	10	12	27
AVRP19_19	72.22 %	0.000	1	0	2	11	25	4
AVRP19_20	61.11 %	0.274	1	2	6	6	15	3
AVRP19_21	61.11 %	0.357	1	4	6	7	14	5
AVRP19_22	72.22 %	0.000	1	0	6	7	26	5
AVRP19_23	77.78 %	0.267	1	2	6	8	13	9
AVRP19_24	55.56 %	0.000	1	0	8	6	24	7
AVRP19_25	77.78 %	0.000	1	0	4	7	23	8
AVRP19_26	61.11 %	0.308	1	2	4	3	17	6
AVRP19_27	61.11 %	0.220	1	2	8	9	18	2
AVRP19_28	83.33 %	0.266	1	2	6	11	17	10
AVRP19_29	77.78 %	0.364	1	2	6	9	14	8
AVRP19_30	72.22 %	0.000	1	0	2	6	22	2

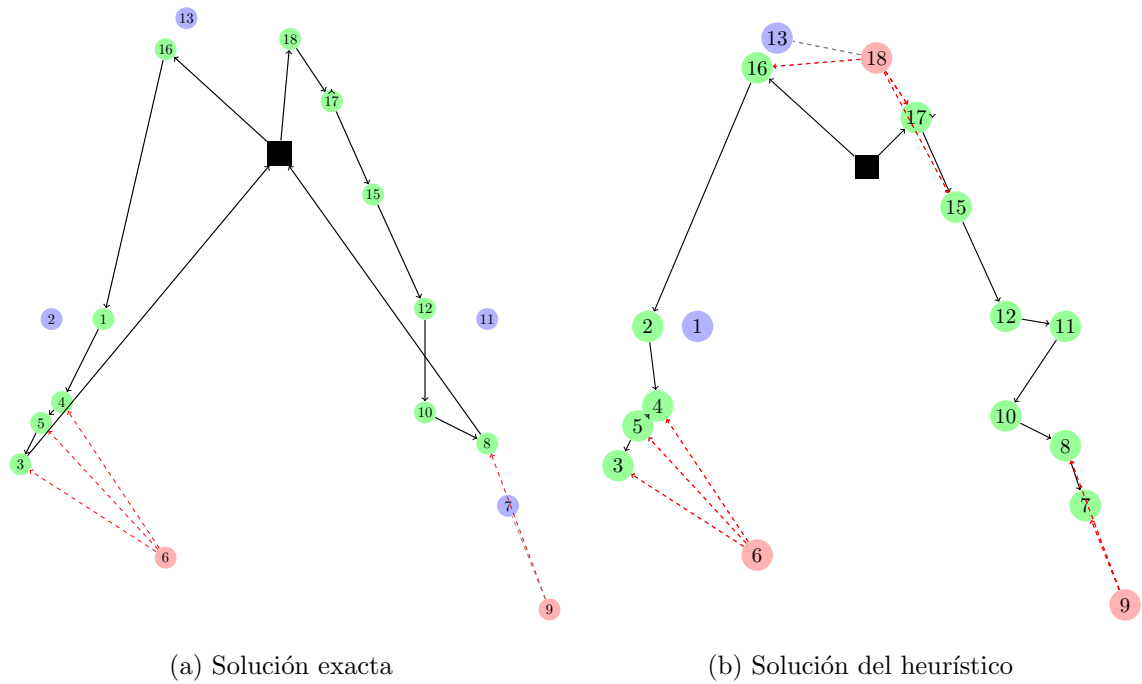


Figura 5.6: Rutas para el ejemplo 10.

En algunas situaciones, todos los indicadores son menores como en el ejemplo

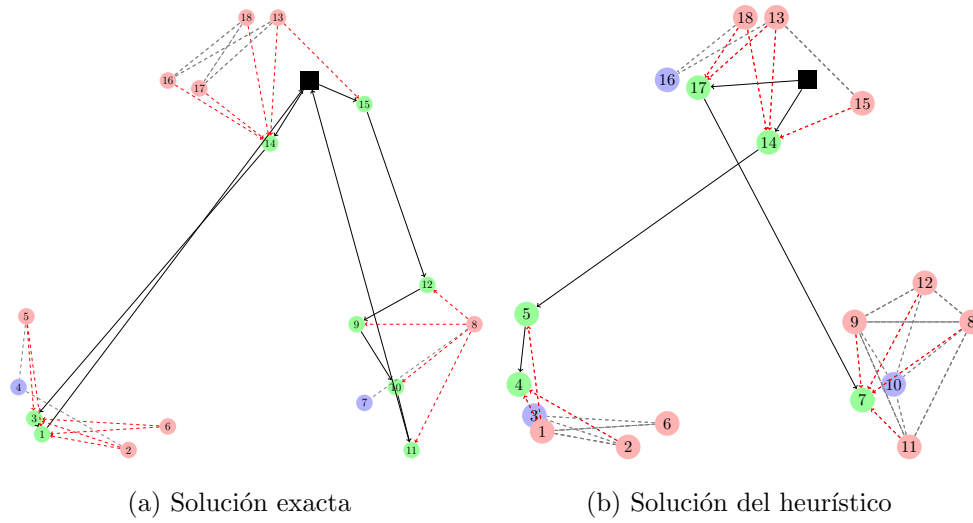


Figura 5.7: Rutas para el ejemplo 4.

AVRP19\_4, figura 5.7, o el porcentaje de nodos cubiertos es mayor pero existen zonas que están aisladas lo que provoca una disminución en la función objetivo debido a la penalización de zonas desatendidas y además totalmente aisladas, como en la figura 5.8 para el ejemplo AVRP19\_19.

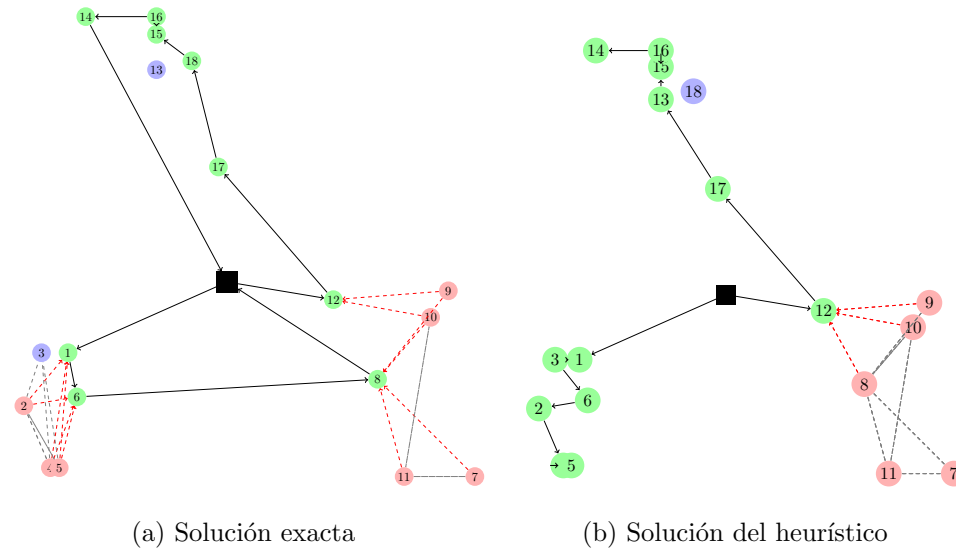


Figura 5.8: Rutas para el ejemplo 19.

En general, el heurístico demostró arrojar una buena solución, cercana incluso a la brindada por el exacto, pero en un tiempo más corto. Esto es importante en

la etapa de respuesta a un desastre, por lo cual este método puede resultar útil. El GAP por sí mismo no es suficiente para analizar los resultados de algoritmo por lo que se incluyen las interpretaciones de cada uno de los indicadores de accesibilidad. En el siguiente capítulo expresamos las conclusiones finales y el trabajo que aún queda por delante.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES

---

## 6.1 CONCLUSIONES

El problema presentado en este trabajo está enfocado en efectuar una distribución equitativa de un bien o servicio aplicando una medida de accesibilidad que considera distancia, desagregación espacial y oportunidades. El término «acceso» se ha utilizado en planeación urbana y está relacionado con la facilidad de las personas para llegar a ciertos lugares y realizar las actividades necesarias en éstos, por lo que otra de las áreas donde puede adoptarse es en logística humanitaria durante la etapa de respuesta debido a que los objetivos perseguidos comunmente en logística comercial, como minimizar longitud de la ruta o el costo de ésta, no pueden ser tomados por sí solos en casos para los cuales las situaciones que tienen que ver con aspectos sociales más que económicos.

Para atacar este problema, una herramienta como una formulación matemática permite capturar las características de aquel y ofrecer la mejor manera de resolverlo. En este caso, para el modelo propuesto se llevó a cabo una experimentación preliminar con ejemplos pequeños para visualizar cómo funciona la medida de accesibilidad cuando se asigna una mayor importancia a cada uno de sus elementos y de esta forma determinar pesos que permiten establecer la prioridad de los componentes. Las

diferentes ponderaciones de los elementos de la medida de accesibilidad provocan variaciones en el resultado de la ruta, sin embargo, en cualquiera de los casos, el objetivo de equidad sigue siendo válido.

Se observó que la solución del problema propuesto era una distribución inclusiva, que es la finalidad de las medidas de accesibilidad, y al compararlo con el modelo propuesto por Current y Schilling (1994), la diferencia se presentaba en la cantidad de nodos desatendidos, en su distribución espacial y en que el primero incluía zonas alejadas, que aunque estaban desatendidas, tenían una oportunidad más cercana para conseguir ayuda.

Debido a que el modelo sólo se resuelve para casos pequeños se propuso un algoritmo el cual ofreció una buena solución en un tiempo menor que el método exacto. En general, los porcentajes de nodos cubiertos y los indicadores de impedimento, oportunidades y desagregación espacial eran similares en ambos casos, aunque aún hay mejoras por hacer en cuanto al heurístico.

## 6.2 TRABAJO A FUTURO

El problema que se presenta toma la forma básica del VRP, en cuanto a que la flota es homogénea, se conocen las distancias y existe un solo depósito donde se encuentran los suministros. Además, toma la característica de límite del tiempo que tiene el *Selective Vehicle Routing Problem*. Pero también sería interesante incluir más consideraciones como el uso de diferentes vehículos y que éstos puedan visitar a varias zonas o añadir más depósitos, entre otras de las variantes del VRP, con el fin de acoplarse a diversas situaciones.

En este trabajo se realiza una aplicación al área de logística humanitaria para distribución de ayuda al considerarse la medida de accesibilidad. Sin embargo, una adaptación de éste puede ser utilizada para otro tipo de actividades como decidir la ubicación de instalaciones como almacenes o fábricas en logística comercial, con lo

que su aplicación puede ser más general.

Las cuestiones relacionadas a los costos no se hacen en este problema debido a que se basa en consideraciones sociales. Aún así, esta opción puede ser incluida como una restricción o como parte de la función objetivo en cuyo caso se requeriría redefinir los pesos de cada uno de los elementos.

Por último, emplear un caso real para resolver este problema con datos verídicos para realizar un mejor análisis del comportamiento de los indicadores de accesibilidad y cómo difiere de otras propuestas que ya existen. Además, realizar adecuaciones al heurístico para que arroje una solución más cercana al óptimo que permita realizar la toma de decisiones en poco tiempo y de manera eficaz.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- AFSHAR, A. y A. HAGHANI (2012), «Modeling integrated supply chain logistics in real-time large-scale disaster relief operations», *Socio-Economic Planning Science*, **46**(4), págs. 327–338.
- AHMADI, M., A. SEIFI y B. TOOTOONI (2015), «A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district», *Transportation Research Part E*, **75**(75), págs. 145–163.
- ALLAHYARI, S., M. SALARI y D. VIGO (2015), «A hybrid metaheuristic algorithm for the multi-depot covering tour vehicle routing problem», *European Journal of Operational Research*, **242**(242), págs. 756–768.
- ALTAY, N. y W. GREEN (2006), «OR/MS research in disaster operations management», *European Journal of Operational Research*, **175**, págs. 475–493.
- BALCIK, B. y B. M. BEAMON (2008), «Facility location in humanitarian relief», *International Journal of Logistics Research and Applications*, **11**(2), págs. 101–121.
- BALICK, B., B. M. BEAMON y K. SMILOWITZ (2008), «Last mile distribution in humanitarian relief», *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning and Operations*, **12**(2), págs. 51–63.
- BALLOU, R. (2004), *Logística. Administración de la cadena de suministros*, Pearson Educación, México.

- BARBAROSOGLU, G. y Y. ARDA (2004), «A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response», *European Journal of Operational Research Society*, **55**(1), págs. 43–53.
- BARBAROSOGLU, G., L. ÖZDAMAR y A. ÇEVİK (2002), «An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operation», *European Journal of Operational Research*, **140**(1), págs. 118–133.
- BEAMON, B. y B. BALCIK (2005), «Distribution Network Design For Humanitarian Relief Chains», proyecto de investigación disponible en <http://courses.washington.edu/ie59x/abstracts/IEseminar05.pdf>.
- BERTOLINI, L., F. LE CLERCQ y L. KAPOEN (2005), «Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward», *Transport policy*, **12**, págs. 207–220.
- BHAT, C., S. HANDY, K. KOCKELMAN, Q. CHEN y L. WESTON (2000), «Development of an urban accessibility index: literature review», proyecto de investigación disponible en [https://ctr.utexas.edu/wp-content/uploads/pubs/4938\\_1.pdf](https://ctr.utexas.edu/wp-content/uploads/pubs/4938_1.pdf).
- BOCAREJO, J. y D. OVIEDO (2012), «Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments», *Journal of Transport Geography*, **24**, págs. 142–154.
- BOISJOLY, G. y A. EL-GENEIDY (2016), «Daily fluctuations in transit and job availability: A comparative assessment of time-sensitive accessibility measures», *Journal of Transport Geography*, **52**, págs. 73–81.
- BOZORGI-AMIRI, A., S. M. JABALAMELI y M. A. E HASHEM (2013), «A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty.», *OR Spectrum*, **35**(4), págs. 905–933.



- CAMPBELL, A., D. VANDENBUSSCHE y W. HERMANN (2008), «Routing for Relief Efforts Transportation Science», **42**(2), págs. 127–145.
- CASCETTA, E., A. CARTENI y M. MONTANINO (2016), «A behavioral model of accessibility based on the number of available opportunities», *Journal of Transport Geography*, **51**, págs. 45–58.
- CHEN, A., F. PEÑA-MORA y Y. OUYANG (2011), «A collaborative GIS framework to support equipment distribution for civil engineering disaster response operations», *Automation in Construction*, **20**(5), págs. 637–648.
- CHURCH, R. y C. REVELLE (1994), «The maximal covering location problem», *Papers of the regional science association*, **32**, págs. 101–118.
- CLARK, A. y B. CULKIN (2007), «A Network Transshipment Model for Planning Humanitarian Relief Operations after a Natural Disaster», *22nd European Conference on Operational Research*, **44**, págs. 1–34.
- CURRENT, J. y D. SCHILLING (1994), «The median tour and maximal covering tour problems», *Urbanet*, págs. 3–49.
- DANTZIG, G. B. y J. H. RAMSER (1959), «The truck dispatching problem», *Management Science*, **6**(1), págs. 80–91.
- DASKIN, M. y K. L. MAASS (2015), «The  $p$ - Median Problem», *Location Science*, págs. 21–45.
- DE ANGELIS, V., M. MECOLI, C. NIKOI y G. STORCHI (2007), «Multi-period integrated routing and scheduling of world food programme cargo planes in Angola», *22nd European Conference on Operational Research*, **34**(6), págs. 1601–1615.
- DE LA TORRE, L., I. DOLINSKAYA y K. SMILOWITZ (2012), «Disaster relief routing: Integrating research and practice», *Socio-Economic Planning Sciences*, **46**, págs. 88–97.

- DEFRYN, C., K. SÖRENSEN y T. CORNELISSENS (2016), «The selective vehicle routing problem in a collaborative environment», *European Journal of Operational Research*, **250**, págs. 400–411.
- DOERNER, K., A. FOCKE y W. GUTJAHR (2007), «Multicriteria tour planning for mobile healthcare facilities in a developing country», *European Journal of Operational Research*, **179**, págs. 1078–1096.
- ESPINOSA, E., I. CANALS, M. MEDA, R. PÉREZ y C. ULÍN (2009), «Cálculo diferencial e integral I», recurso libre, disponible en <http://canek.uam.mx/>.
- FLORES, D., M. SALAZAR, S. ULRICH y G. LAPORTE (2015), «The multi-vehicle cumulative covering tour problem», *Annals of Operations Research*.
- GAYTÁN, J., P. ARROYO y R. ENRÍQUEZ (2012), «Un modelo bi-criterio para la ubicación de albergues, como un plan de evacuación en caso de inundaciones», *Revista Ingeniería Industrial*, **11**(2), págs. 35–56.
- GENDREAU, M., G. LAPORTE y F. SEMET (1997), «The Covering Tour Problem», *Operations Research*, **45**(4), págs. 568–576.
- GEURS, K. y B. VAN WEE (2004), «Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions», *Journal of Transport Geography*, **12**(2), págs. 127–140.
- HABIB, M., Y. LEE y M. MEMON (2016), «Mathematical Models in Humanitarian Supply Chain Management: A Systematic Literature Review», *Mathematical Problems in Engineering*, **2016**, págs. 1–20.
- HACHICHA, M., M. HODGSON, G. LAPORTE y F. SEMET (2000), «Heuristics for the multi-vehicle covering tour problem», *Computers & Operations Research*, **27**, págs. 29–42.
- HANDY, S. y NIEMEIER (1997), «Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives», *Environment and Planning*, **29**, págs. 1175–1194.

- HILLIER, F. y G. LIEBERMAN (2006), *Introducción a la Investigación de Operaciones*, 8ª edición, McGraw Hill.
- HODGSON, M., G. LAPORTE y F. SEMET (1998), «A covering tour model for planning mobile healthcare facilities in Suhum district, Ghana», *Journal of Regional Science*, **38**(4), págs. 621–639.
- HUANG, M., K. SMILOWITZ y B. BALICK (2013), «A continuous approximation approach for assessment routing in disaster relief», *Transportation Research Part B: Methodological*, **50**, págs. 20–41.
- JABBARZADEH, A., B. FAHIMNIA y S. SEURING (2014), «Dynamic supply chain network design for the supply of blood in disasters: a robust model with real world application», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **70**(1), págs. 225–244.
- JALLER, M. y J. HOLGUÍN-VERAS (2013), «Locating points of distribution in large urban disasters», <http://transp.rpi.edu/HUM-LOG/Doc/Vault/PODs.pdf>.
- JOZEFOWIEZ, N., F. SEMET y E. TALBI (2007), «Bi-objective covering tour problem», *Computers and Operations Research*, **34**(7), págs. 1929–1942.
- JOZEFOWIEZ, N., F. SEMET y E. TALBI (2008), «Multi-objective vehicle routing problems», *European Journal of Operational Research*, **189**, págs. 293–309.
- KNOTT, R. (1987), «The logistics of bulk relief supplies», *Disasters*, **175**(1), págs. 475–493.
- LÜER, A., M. BENAVENTE, J. BUSTOS y B. VENEGAS (2009), «El problema de rutas de vehículos: Extensiones y métodos de resolución, estado del arte», Conference Paper en Workshop Internacional EIG2009.
- LIBERATORE, F., M. ORTUÑO, G. TIRADO, B. VITORIANO y M. SCAPARRA (2014), «A hierarchical compromise model for the joint optimization of recovery operations and distribution of emergency goods in Humanitarian Logistics», *Computers & Operations Research*, **42**, págs. 3–13.

- LIN, Y.-H., R. BATTA, P. ROGERSON, A. BLATT y M. FLANIGAN (2011), «A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster», *Socio-Economic Planning Science*, **45**(4), págs. 132–145.
- MAKRÍ, M.-C. y C. FOLKESSON (1999), «Accessibility Measures for Analyses of Land Use and Travelling with Geographical Information Systems», Proceedings of the 2nd KFB-Research Conference.
- METE, H. y Z. ZABINSKY (2010), «Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management», *International Journal of Production Economics*, **126**(1), págs. 76–84.
- NAJI-AZIMI, Z., J. RENAUD, A. RUIZ y M. SALARI (2012), «A covering tour approach to the location of satellite distribution centers to supply humanitarian aid», *European Journal of Operational Research*, **222**, págs. 595–605.
- NOLTZ, P., W. GUTJAHR y R. HARTL (2010), «A bi-objective metaheuristic for disaster relief operation planning», *Multi-Obj. Nature Inspired Computing*, págs. 167–187.
- OZBAY, K. y E. E. ERMAN, OZGUVEN (2007), «Stochastic humanitarian inventory control model for disaster planning», *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, **2022**, págs. 63–75.
- PAPA, E., C. SILVA, M. BROMMELSTROET y A. HULL (2016), «Accessibility instruments for planning practice: A review of European experiences», *The Journal of Transport and Land Use*, págs. 1–20.
- PEREZ, N., J. HOLGUIN-VERAS, J. MITCHELL y T. SHARKEY (2010), «Integrated vehicle routing problem with explicit considerations of social costs in humanitarian logistics», <http://transp.rpi.edu/HUM-LOG/Doc/Vault/IRP.pdf>.
- RAWLS, C. y M. TURNQUIST (2010), «Pre-positioning of emergency supplies for disaster response.», *Transportation Research Part b*, **44**, págs. 521–534.

- ROCHA, L., C. GONZÁLEZ y J. ORJUELA (2011), «Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución», *Ingeniería*, **16**(2), págs. 35–55.
- SALMERÓN, J. y A. APTE (2010), «Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning», *Production and Operations Management*, **19**(5).
- SCHEURER, J. y C. CURTIS (2007), «Accessibility measures: overview and practical applications», Working paper.
- SHEN, Z., F. ORDÓÑEZ y M. DESSOUKY (2009), «The stochastic vehicle routing problem for minimum unmet demand», *Optimization and logistics challenges in the enterprise*, págs. 349–369.
- SHEU, J. (2014), «SPost-disaster relief-service centralized logistics distribution with survivor resilience maximization», *Transportation Research Part B: Methodological*, **68**, págs. 288–314.
- SONG, S. (1996), «Some tests of alternative accessibility measures: a population density approach», *Land Economics*, **72**(4), págs. 474–482.
- TAHA, H. (2012), *Investigación de operaciones*, 9ª edición, Pearson, México.
- TIRADO, G., F. MARTÍN-CAMPO, B. VITORIANO y M. ORTUÑO (2014), «A lexicographical dynamic flow model for relief operations», *International Journal of Computational Intelligence Systems*, **7**(1), págs. 45–57.
- TZENG, G.-H., H.-J. CHENG y T. HUANG (2007), «Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**(11), págs. 673–686.
- VAN HENTENRYCK, P., R. BENT y C. COFFRIN (2010), «Strategic planning for disaster recovery with stochastic last mile distribution», *Integration of AI and OR techniques in constraint programming for combinatorial optimization problems*.

- VAN WASSENHOVE, L. (2006), «Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear», *Journal of Operational Research Society*, **57**, págs. 475–489.
- VAN WYK, E., W. BEAN y V. YADAVALLI (2011), «Modelling of uncertainty in minimising the cost of inventory for disaster relief», *South African Journal of Industrial Engineering*, **22**(1), págs. 1–11.
- VANSTEENWEGEN, P., W. SOUFFRIAU y D. OUDHEUSDEN (2011), «The orienteering problem: a survey», *European Journal of Operational Research*, **209**, págs. 1–10.
- VISWANATH, K. y S. PEETA (2006), «Multicommodity maximal covering network design problem for planning critical routes for earthquake response», *Transportation Research Record*.
- VITORIANO, M., M. ORTUÑO y G. TIRADO (2009), «HADS, a goal programming-based humanitarian aid distribution system», *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, **16**(1).
- VITORIANO, M., M. ORTUÑO, G. TIRADO y J. MONTERO (2011), «A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution», *Journal of Global Optimization*, **51**(2), págs. 189–208.
- WANG, H., L. DU y M. S.H. (2014), «Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **69**, págs. 160–179.
- YI, W. y A. KUMAR (2007), «Ant colony optimization for disaster relief operations», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation*, **43**(6), págs. 660–672.
- YI, W. y L. OZDAMAR (2007), «A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities», *European Journal of Operational Research*, **179**(3), págs. 1177–1193.

- ÖZDAMAR, L. y O. DEMİR (2012), «A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**(3), págs. 591–602.
- ÖZDAMAR, L., E. EKINCI y B. KÜÇÜYAZICI (2004), «Emergency Logistics Planning in Natural Disasters», *Annals of Operations Research*, **129**, págs. 217–245.
- ZHU, J., J. HUANG, D. LIU y J. HAN (2008), «Resources Allocation Problem for Local Reserve Depots in Disaster Management Based on Scenario Analysis», *The 7th International Symposium on Operations Research and its Applications*, págs. 395–407.

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

---

Melanie Solís Mata

Candidato para obtener el grado de  
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

DISTRIBUCIÓN DE AYUDA HUMANITARIA CON ACCESIBILIDAD  
COMO MEDIDA DE DESEMPEÑO

Nací el 27 de marzo de 1990 en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. Mis padres son Francisco Javier Solís Alvarado y María de Jesús Mata Aranda. Realicé mis estudios de licenciatura en Matemáticas en la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León del 2009 al 2013. A partir del 2015 comencé la maestría en Logística y Cadena de Suministro en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.